



TUGAS AKHIR - TE141599

DAMPAK PEMASANGAN UPFC (*UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER*) TERHADAP STABILITAS TEGANGAN PADA SISTEM KELISTRIKAN SUMATRA BAGIAN UTARA BERDASARKAN RUPTL TAHUN 2022

Khalid Oki Wibowo
NRP 2215105021

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc. Ph.D.
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST. M.Sc. Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TE 141599

DAMPAK PEMASANGAN UPFC (*UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER*) TERHADAP STABILITAS TEGANGAN PADA SISTEM KELISTRIKAN SUMATRA BAGIAN UTARA BERDASARKAN RUPTL TAHUN 2022

Khalid Oki Wibowo
NRP 2215105021

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc. Ph.D.
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST. M.Sc. Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

***THE EFFECT INSTALLATION OF UPFC (UNIFIED POWER
FLOW CONTROLLER) TO VOLTAGE STABILITY ON
ELECTRICITY SYSTEM OF NORTH SUMATRA BASED
RUPTL 2022***

Khalid Oki Wibowo
NRP 2215105021

Counsellor Lecturer
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc. Ph.D.
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST. M.Sc. Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Dampak Pemasangan Upfc (*Unified Power Flow Controller*) Terhadap Stabilitas Tegangan Pada Sistem Kelistrikan Sumatra Bagian Utara Berdasarkan RUPTL Tahun 2022”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

Khalid Oki Wibowo
NRP:2215 105 021

**DAMPAK PEMASANGAN UPFC (UNIFIED POWER FLOW
CONTROLLER) TERHADAP STABILITAS TEGANGAN PADA
SISTEM KELISTRIKAN SUMATERA BAGIAN UTARA
BERDASARKAN RUPTL TAHUN 2022**

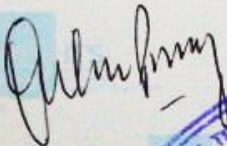
TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



26.7.2017

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc. Ph.D. Vita L. B. Putri, ST, M.Sc. Ph.D.
NIP. 194907151974121001 NIP. 198208292006042001



DAMPAK PEMASANGAN UPFC (*UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER*) TERHADAP STABILITAS TEGANGAN PADA SISTEM KELISTRIKAN SUMATRA BAGIAN UTARA BERDASARKAN RUPTL TAHUN 2022

Nama : Khalid Oki Wibowo
Pembimbing I : Prof. Ir Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D
Pembimbing II : Vita Lystianingrum B. Putri, ST. M.Sc. Ph.D.

ABSTRAK

Sebagai salah satu pusat beban di wilayah Sumatra, sistem kelistrikan Provinsi Sumatra Utara tahun 2022 mengalami pengembangan yang signifikan, yaitu pada transmisi 275 kV sebesar 440 kms dan Gardu Induk dengan total kapasitas 1030 MVA. Adanya perubahan sistem kelistrikan yang signifikan, menjaga stabilitas sistem tenaga menjadi permasalahan utama dari operasi sistem yang kompleks. Dalam kondisi ini, sistem dapat distabilkan dengan peralatan *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS). Salah satu peralatan FACTS yang umum digunakan adalah UPFC (*Unified Power Flow Controller*). UPFC dapat berfungsi mengatur tegangan dan aliran daya pada bus untuk sistem kelistrikan yang optimal. Identifikasi kestabilan tegangan menggunakan metode *continuation Power Flow* (CPF) melalui kurva PV untuk melihat kondisi tegangan profil saat mencapai *Maximum Loading Parameter* (MLP). Bus dengan profil tegangan dibawah 0,95 pu dan menghasilkan penurunan *losses* paling besar dipilih sebagai bus kritis untuk lokasi pemasangan UPFC. Tujuan pada tugas akhir ini untuk membandingkan sebelum dan sesudah pemasangan UPFC terhadap stabilitas tegangan di sistem. Dengan pemasangan UPFC pada bus kritis mampu meningkatkan profil tegangan dengan persentase 0,01-2,09%, dan menurunkan *losses* pada sistem sebesar 3,7MW (6,39%), sehingga daya pembangkitan sistem menjadi turun dan biaya pembangkitan sistem semakin murah.

Kata Kunci : *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS), Kurva PV, UPFC, Sistem Kelistrikan Provinsi Sumatra Utara, MLP, CPF.

Halaman ini sengaja dikosongkan

THE EFFECT INSTALLATION OF UPFC (UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER) TO VOLTAGE STABILITY ON ELECTRICITY SYSTEM OF NORTH SUMATRA BASED RUPTL 2022

Name : Khalid Oki Wibowo
Advisor I : Prof. Ir Ontoseno Penangsang, M.Sc. Ph.D.
Advisor II : Vita Lystianingrum B. Putri, ST. M.Sc. Ph.D.

ABSTRACT

As one of the load center in Sumatra, North Sumatra provincial electricity system in 2022 occurred a significant development, that is 440 kms of transmission 275kV and 1030 MVA of total capacity substation. Changing significant in the electrical system, to maintain the stability of the power system is the main problem of the operating system. In this condition, the system can be stabilized with equipment Flexible AC Transmission Systems (FACTS). One of the FACTS equipment commonly used is UPFC (Unified Power Flow Controller). UPFC can function to regulate the voltage and power flow on the bus for optimal electrical system. Identify of voltage stability using Continuation Power Flow (CPF) through PV curve to see the condition of the voltage profile when reach Maximum Loading Parameter (MLP). Bus with voltage profile below 0,95 pu and gives lowest power losses on the system is selected as critical bus for UPFC installation. The purpose of this final project to compare before and after installation of UPFC on the voltage stability in the system. The installation of UPFC on the critical bus is able to increase the voltage profile with percentage 0,01-2,09%, and to decrease losses in the system with value 3,7MW(6,39%) and 21,51 MVAR (3,8%), so that the power of generation become smaller and the cost of generation system is getting cheaper.

Keywords : Flexible AC Transmission Systems (FACTS), PV curves, UPFC, Electrical Systems of North Sumatra province, MLP, CPF.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan karunianya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

“DAMPAK PEMASANGAN UPFC (*UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER*) TERHADAP STABILITAS TEGANGAN PADA SISTEM KELISTRIKAN SUMATRA BAGIAN UTARA BERDASARKAN RUPTL TAHUN 2022”

Dengan dilaksanakannya Tugas Akhir ini, mempunyai harapan dapat menerapkan pengalaman dan ilmu yang telah didapatkan pada jenjang yang lebih tinggi. Penyusunan tugas akhir ini penyusun tidak terlepas dari bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis hendak menyampaikan rasa terima kasih kepada pihak – pihak yang telah membantu. Ucapan terima kasih ini kami sampaikan kepada :

1. Allah SWT yang telah memberi rahmatNya dalam pembuatan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua yang telah memberikan dukungan penuh dan teladan bagi penulis.
3. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc., Ph.D dan Ibu Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST. M.Sc. Ph.D. selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing penulis dalam pembuatan tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberikan ilmu yang bermanfaat selama kuliah.
5. Seluruh teman mahasiswa lintas jalur angkatan 2015, khususnya teman-teman seperjuangan D3 Elektro Industri ITS 2012, yaitu Shofi, Fidya, Dirman, Angga, Dahlan, Dani, Aji dan seluruh asisten Laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik yang telah memberikan saran dan motivasi serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata semoga buku ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

Halaman

JUDUL

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Permasalahan	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan dan Manfaat	3
1.5. Metodologi	3
1.6. Sistematika Penulisan	4

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1. Daya pada Sistem Tiga Fasa	7
2.2. Studi Aliran Daya	8
2.2.1. Arah Aliran Daya	9
2.2.2. Persamaan Aliran Daya	10
2.2.3. Aliran dan Rugi-rugi pada Saluran	11
2.2.4. Metode Newton Raphson	12
2.3. Stabilitas Tenaga Listrik	16
2.3.1. Kestabilan Tegangan	16
2.3.2. Kestabilan Transien	17
2.4. <i>Voltage Collapse</i>	17
2.5. Kurva PV	17
2.6. <i>Continuation Power Flow</i> (CPF)	19
2.6.1. Reformulasi Persamaan Aliran Daya	20
2.6.2. <i>Prediction Step</i>	20
2.6.3. <i>Correction Step</i>	21
2.7. <i>Unified Power Flow Controller</i> (UPFC)	22

2.7.1. Dasar Prinsip Kerja UPFC	22
2.7.2. Persamaan Aliran Daya UPFC	23
2.7.3. Batasan Operasi UPFC	25
BAB 3 PEMODELAN SISTEM	
3.1. Sistem Kelistrikan Sumatera Utara 150kV dan 275kV	27
3.2. Klasifikasi Bus pada Sistem Kelistrikan Sumatera Utara 150kV dan 275kV	32
3.3. Analisa Kestabilan Tegangan	34
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	
4.1. Simulasi dan Analisis <i>Power Flow</i> pada Sistem Kelistrikan	37
4.2. Analisa Stabilitas Tegangan sebelum Pemasangan UPFC	42
4.3. Pemasangan UPFC	47
4.3.1. Nilai Optimal Setting Parameter UPFC	48
4.3.2. Perbandingan Pemasangan UPFC di Saluran 58-11 dan Saluran 35-10	48
4.4. Analisis Stabilitas Tegangan Setelah Pemasangan UPFC	49
4.4.1. Profil Tegangan Bus Sistem 150kV dan 275kV	53
4.4.2. Besar Pembangkitan dan Rugi-rugi Daya Sistem Tegangan 150kV dan 275kV	59
BAB 5 PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	65
RIWAYAT HIDUP	77

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. (a) Hubungan wye (Y), (b) Hubungan delta (Δ).	7
Gambar 2.2. Diagram satu garis sistem sederhana	8
Gambar 2.3. Arah aliran P dan Q.....	9
Gambar 2.4. Tipikal bus dari sistem tenaga.....	10
Gambar 2.5. Model saluran transmisi untuk perhitungan aliran pada saluran	11
Gambar 2.6. Diagram ilustrasi metode Newton Raphson.....	12
Gambar 2.7. Karakteristik kurva PV	18
Gambar 2.8. Urutan perhitungan analisa <i>continuation power flow</i>	19
Gambar 2.9. Skema <i>Unifield Power Flow Controller</i> (UPFC).....	22
Gambar 2.10. Rangkaian ekivalen UPFC	23
Gambar 3.1. <i>Single line diagram</i> sistem kelistrikan Sumatera Utara 150kV dan 275kV	27
Gambar 3.2. Diagram alir metodologi penelitian	35
Gambar 4.1. Grafik perbandingan profil tegangan (a)bus 1-25, (b) bus 26-50, (c)bus 51-75	41
Gambar 4.2. Hasil <i>Continuation Power Flow</i> (CPF) sebelum pemasangan UPFC.....	43
Gambar 4.3. Grafik profil tegangan bus kritis sistem 150kV dan 275kV	46
Gambar 4.4. Hasil <i>Continuation Power Flow</i> (CPF) setelah pemasangan UPFC.....	49
Gambar 4.5. Grafik perubahan arus yang mengalir pada saluran (a) 1-25, (b)26-47, (c)48-68, (d)69-90, dan (e)91-110 saat kondisi sebelum dan sesudah pemasangan UPFC.....	52
Gambar 4.6. Grafik profil tegangan bus sistem sebelum dan setelah pemasangan UPFC bus nomor (a) 1-20, (b)21-40, (c) 41-60, dan (d)61-75	57

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1. Data saluran sistem kelistrikan Sumatera Utara 150kV. ..	28
Tabel 3.2. Data saluran sistem interkoneksi Sumatera Utara 275kV.	32
Tabel 3.3. Data pembangkitan dan beban sistem interkoneksi Sumatera Utara 150 kV dan 275 kV.....	33
Tabel 4.1. Hasil simulasi <i>power flow</i> bus sistem 150kV dan 275kV.	37
Tabel 4.2. Hasil simulasi <i>Continuation Power Flow</i> (CPF) sebelum pemasangan UPFC	44
Tabel 4.3. Hasil perhitungan penurunan tegangan pada 10 bus terkritis hasil <i>Continuation Power Flow</i> (CPF).....	45
Tabel 4.4. Parameter untuk UPFC.....	47
Tabel 4.5. Nilai Optimal Parameter UPFC	48
Tabel 4.6. Hasil Pemasangan UPFC di saluran 58-11 dan saluran 35-10.....	48
Tabel 4.7. Hasil simulasi <i>Continuation Power Flow</i> (CPF) setelah pemasangan UPFC	50
Tabel 4.8. Peningkatan profil tegangan bus sistem 150kV dan 275kV setelah pemasangan UPFC di saluran 35-10.....	54
Tabel 4.9. Perbandingan besar pembangkitan dan <i>losses</i> sebelum dan sesudah pemasangan UPFC	60

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Dalam sistem kelistrikan yang kompleks, proses penyaluran energi listrik dari pembangkit ke konsumen. Stabilitas tenaga listrik adalah aspek yang penting dipertimbangkan. Sistem tenaga listrik harus dioperasikan dengan mempertahankan daya saluran dan tegangan bus secara optimal untuk memenuhi kebutuhan beban yang fluktuatif. PLN sebagai badan usaha penyedia energi listrik membuat perencanaan tenaga listrik 10 tahunan yaitu rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) untuk memprediksi beban, pembangkit, dan transmisi sistem tenaga listrik kedepannya.

Pada RUPTL 2016-2025, sistem kelistrikan Provinsi Sumatra Utara tahun 2022 mengalami pengembangan yang besar pada sisi transmisi dan Gardu Induk, yaitu transmisi 275kV sebesar 440 kms dan total kapasitas gardu induk sebesar 1030 MVA[1]. Adanya perubahan sistem kelistrikan yang signifikan menyebabkan sistem tenaga listrik menjadi lebih rumit dan sulit dikontrol. Konsekuensi dari hal ini adalah kehilangan stabilitas sistem. Salah satu diantaranya adalah stabilitas tegangan. Ketidakstabilan tegangan adalah penyebab *voltage collapse* pada sistem. *Voltage collapse* terjadi saat sistem dibebani melebihi titik maksimum pembebanan. Dampak dari *voltage collapse* dapat menyebabkan rugi-rugi daya pada transmisi[2].

Dalam kondisi ini, sistem dapat distabilkan dengan peralatan *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS). Peralatan FACTS merupakan peralatan yang mampu meningkatkan loading parameter beban, mengurangi kerugian sistem, meningkatkan stabilitas sistem. Salah satu peralatan FACTS yang umum digunakan adalah UPFC (*Unified Power Flow Controller*). UPFC dapat berfungsi mengatur tegangan dan aliran daya pada bus. Untuk memperoleh manfaat dari penggunaan UPFC, ada beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan baik letak pemasangan atau *setting* parameter UPFC untuk sistem kelistrikan yang

optimal. Oleh karena itu, UPFC harus terpasang dengan benar pada sistem dengan parameter yang sesuai sehingga dapat meningkatkan stabilitas tegangan dan kemampuan transfer daya jaringan transmisi[3].

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisis dampak pemasangan UPFC (*Unified Power Flow Controller*) terhadap kestabilan tegangan di sistem kelistrikan provinsi Sumatera bagian Utara tahun 2022 berdasarkan RUPTL 2016-2025.
2. Menganalisis kestabilan tegangan sistem akibat adanya penambahan beban.
3. Menentukan lokasi terbaik pemasangan UPFC di sistem kelistrikan provinsi Sumatera bagian Utara.
4. Menentukan parameter UPFC dalam meningkatkan kestabilan tegangan sistem.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Analisa *power flow* secara simulasi menggunakan software PSAT 2.1.8 berbasis MATLAB dan PowerWorld 9, sedangkan analisa penempatan dan nilai parameter UPFC secara simulasi menggunakan software PSAT 2.1.8 berbasis MATLAB.
2. Pembahasan pada tugas akhir ini adalah stabilitas *steady state*.
3. Sumber data yang digunakan adalah RUTPL sistem kelistrikan provinsi Sumatera Utara tahun 2022 dan *power system analysis of Lab. PSSS ITS*.
4. Objek penelitian dalam tugas akhir ini adalah beban *peak* sistem kelistrikan Sumatera Utara 150kV dan 275kV tahun 2022.
5. Analisis dan simulasi dalam tugas akhir ini mengabaikan sistem kontrol, karakteristik rating peralatan pada sistem dan jenis serta karakteristik UPFC.

1.4 Tujuan dan Manfaat

Adapun tujuan dalam tugas akhir ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemasangan UPFC pada perencanaan sistem kelistrikan provinsi Sumatera bagian Utara tahun 2022.

Adapun manfaat dalam penyusunan tugas akhir ini adalah dapat memberi penilaian bagi perusahaan terutama penyedia energi listrik sebagai analisis stabilitas tegangan pada sistem kelistrikan provinsi Sumatera bagian Utara 2022 setelah adanya pengembangan saluran transmisi dan gardu induk.

1.5 Metodologi

Adapun metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan data dan studi literatur

Studi literatur perlu dilakukan untuk menunjang penguasaan pustaka tentang aliran daya, stabilitas tegangan, peralatan FACTS. Dalam pengerjaan dan penelitian Tugas Akhir (TA), pencarian pustaka melalui *paper* ilmiah, buku elektronik, dan buku pustaka di perpustakaan. Pengumpulan data dan pemodelan sistem. Data-data yang digunakan adalah data sistem kelistrikan Sumatera Utara baik existing maupun pengembangan. Data tersebut meliputi data pembangkitan, data beban, dan data transmisi setiap bus.

2. Pemodelan sistem

Dalam pemodelan sistem dan simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak software PSAT (*Power System Analysis Toolbox*) 2.1.8 berbasis MATLAB. Pemodelan dalam tugas akhir ini dilakukan berupa *single line diagram* pada *software* simulator. Data-data yang telah didapatkan dimasukkan ke dalam *software* PSAT.

3. Simulasi dan analisis

Simulasi dan analisis dilakukan dengan *load flow* menggunakan software PSAT lalu dibandingkan dengan simulasi menggunakan PowerWorld 9 untuk validasinya. Dari hasil

running program tersebut untuk mengetahui karakteristik profil tegangan pada setiap bus. Dengan bantuan kurva PV melalui simulasi CPF (*Continuation Power Flow*) dapat menunjukkan kondisi tegangan pada setiap operasi untuk mengamati kestabilan tegangan. Nilai tegangan bus saat mencapai titik pembebanan maksimum digunakan untuk memilih letak pemasangan UPFC. Perbaikan nilai tegangan dilakukan dengan perhitungan nilai UPFC yang akan diinputkan pada bus yang memiliki nilai tegangan terendah. Kemudian dilakukan analisis variasi pembebanan. Nilai pembangkitan dan *losses* juga diamati untuk membandingkan kondisi sebelum dan sesudah pemasangan UPFC.

4. Penulisan Buku Tugas Akhir

Pada tahap ini merupakan laporan akhir dari pengerjaan tugas akhir. Laporan ini berisi pemecahan masalah pada kelistrikan sebenarnya dengan mengaplikasikan teori yang dipelajari. Selain itu diberikan saran atau rekomendasi untuk perbaikan tugas akhir kedepannya.

1.6 Sistematika penulisan

Dalam penulisan tugas akhir ini terbagi menjadi lima bab sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi pengerjaan tugas akhir, sistematika pembahasan dan relevansi dari penulis.

BAB II : LANDASAN TEORI

Pada bab ini menjelaskan teori-teori penunjang yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

BAB III : PEMODELAN SISTEM

Dalam bab ini menjelaskan bagaimana konfigurasi sistem kelistrikannya, metode pelaksanaan studi serta penerapannya dalam studi kasus pada sistem, dan beberapa hal mengenai operasi sistem kelistrikan Sumatera Utara.

BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Berisi tentang hasil dari simulasi *power flow* dan kurva PV beserta analisis mengenai pengaruh penambahan UPFC pada bus terkritik dan bagaimana dampak pemasangan UPFC terhadap kestabilan sistem kelistrikan Sumatera Utara.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil simulasi, studi literatur dan analisis yang telah dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Daya pada Sistem Tiga Fasa[4]

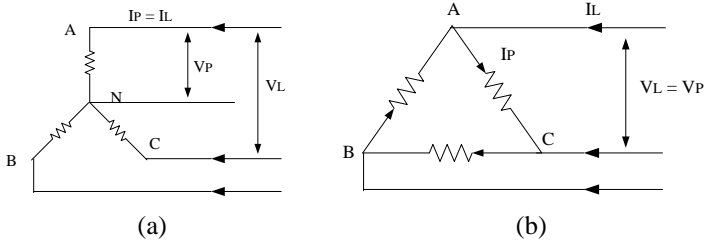
Daya yang disuplai generator tiga fasa atau yang diserap beban tiga fasa adalah penjumlahan daya dari tiap-tiap fasa. Dalam rangkaian seimbang, daya setiap fasa besarnya sama sehingga seperti mengalikan 3 dengan daya satu fasa.

$$P = 3 \times P_{1\phi} = 3|V_p||I_p| \cos \theta_p \quad (2.1)$$

$$Q = 3|V_p||I_p| \sin \theta_p \quad (2.2)$$

$$S = P + jQ = 3|V_p||I_p| \cos \theta_p + j 3|V_p||I_p| \sin \theta_p \quad (2.3)$$

Dimana $\theta_p = \theta_v - \theta_i$ adalah sudut fasa *I lagging* terhadap *V*. Gambar 2.1 di bawah ini merupakan susunan belitan yang dihubungkan bintang (wye) dan segitiga (delta).



Gambar 2.1 (a) Hubungan wye (Y), (b) Hubungan delta (Δ)

Pada beban yang terhubung wye (Y),

$$|V_p| = \frac{|V_L|}{\sqrt{3}} \text{ dan } |I_p| = |I_L| \quad (2.4)$$

Pada beban yang terhubung delta (Δ),

$$|I_p| = \frac{|I_L|}{\sqrt{3}} \text{ dan } |V_p| = |V_L| \quad (2.5)$$

Persamaan (2.4) dan (2.5) dimasukkan pada persamaan (2.1) dan (2.2), sehingga diperoleh,

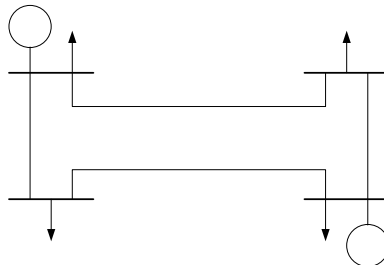
$$P = \sqrt{3}|V_L||I_L| \cos \theta_p \quad (2.6)$$

$$Q = \sqrt{3}|V_L||I_L| \sin \theta_p \quad (2.7)$$

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}|V_L||I_L| \quad (2.8)$$

2.2 Studi Aliran Daya

Aliran daya adalah studi dasar dalam menganalisa dan mempelajari aliran energi listrik yang mengalir pada suatu sistem tenaga listrik. Studi ini dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai daya atau tegangan sistem dalam kondisi *steady-state*. Informasi tersebut sangat berguna untuk menilai operasi sistem tenaga listrik dan mengetahui baik kondisi pembangkit, saluran maupun pembebanan dimana beban bersifat menyerap daya sedangkan pembangkit listrik bersifat mengeluarkan daya[4]. Gambar 2.2 di bawah ini menunjukkan sebuah *single line diagram* sistem sederhana.



Gambar 2.2 Diagram satu garis sistem sederhana

Bus pada sistem umumnya terbagi menjadi 3 macam[5], yaitu :

a. *Slack/Swing bus*

Tipe bus yang magnitud tegangan $|V|$ dan $\theta = 0^\circ$ (referensi) diketahui dan tetap, terhubung dengan generator, daya nyata (P) dan daya reaktif (Q) didapat hasil perhitungan dan berfungsi untuk mencatu rugi-rugi daya dan beban yang tidak dapat disuplai oleh generator lain.

b. *Load bus* (bus PQ)

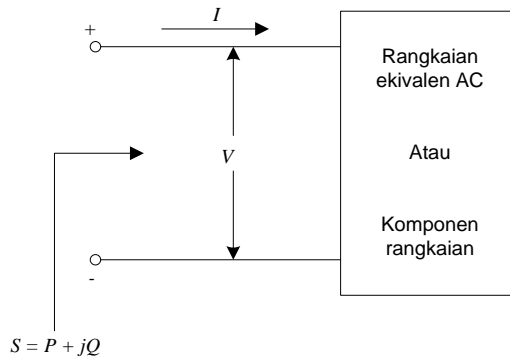
Tipe bus ini daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui dan tetap, sedangkan magnitud tegangan $|V|$ dan θ (sudut phasa) didapat dari hasil perhitungan dan terhubung dengan beban.

c. *Generator bus* (bus PV)

Tipe bus ini magnitud tegangan $|V|$ dan daya aktif (P) diketahui dan tetap sedangkan daya reaktif (Q) dan θ (sudut fasa) didapat dari hasil perhitungan, dan terhubung dengan generator.

2.2.1 Arah Aliran Daya[5]

Dalam meninjau aliran daya sebuah sistem, tanda P dan Q pada hubungan P, Q, dan V atau tegangan yang dibangkitkan adalah hal yang sangat penting untuk mengetahui daya diserap atau disuplai oleh mesin ketika tegangan dan arus telah ditentukan. Gambar 2.3 di bawah ini merupakan arah aliran daya aktif dan daya reaktif pada suatu rangkaian atau peralatan, dimana $S = VI^* = P + jQ$.



Gambar 2.3 Arah aliran P dan Q

Jika $P > 0$, maka rangkaian menyerap daya nyata.

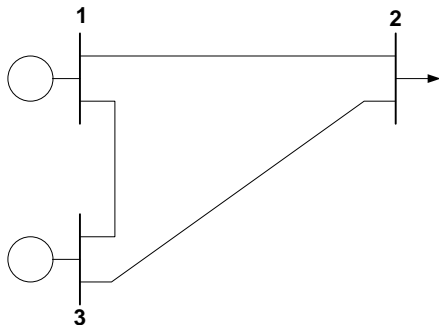
Jika $P < 0$, maka rangkaian mensuplai daya nyata.

Jika $Q > 0$, maka rangkaian menyerap daya reaktif (I lags V).

Jika $Q < 0$, maka rangkaian mensuplai daya reaktif (I leads V).

2.2.2 Persamaan Aliran Daya[5]

Gambar 2.4 di bawah ini merupakan bus pada umumnya dari sistem tenaga yang ditunjukkan pada, persamaan daya yang terjadi merupakan aplikasi penggunaan KCL (*Kirchoff Current Law*).



Gambar 2.4 Tipikal bus dari sistem tenaga

Daya masuk bus = Daya keluar bus

$$S_1 = S_{12} + S_{13} \quad (2.9)$$

$$P_1 + jQ_1 = (P_{12} + jQ_{12}) + (P_{13} + jQ_{13}) \quad (2.10)$$

$$P_1 + jQ_1 = V_1 I_{12}^* + V_1 I_{13}^* \quad (2.11)$$

$$P_1 + jQ_1 = V_1 (I_{12} + V_1 I_{13})^* \quad (2.12)$$

$$P_1 + jQ_1 = V_1 I_1^* \quad (2.13)$$

Atau

$$P_1 - jQ_1 = V_1^* I_1 \quad (2.14)$$

Berdasarkan matrik persamaan $I_{bus} = Y_{bus} V_{bus}$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Maka.

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \quad (2.16)$$

Substitusi untuk I_1 pada persamaan berikut, hasilnya :

$$P_1 - jQ_1 = V_1 * (Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4) \quad (2.17)$$

Maka persamaan aliran daya pada bus i , yaitu :

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.18)$$

Besar daya nyata dan daya reaktif dari persamaan (2.18)

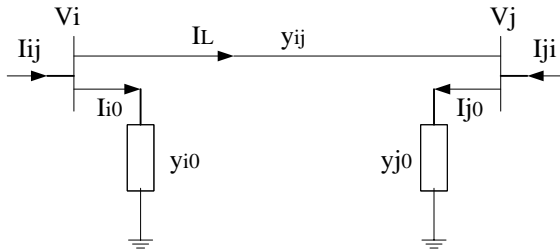
$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.19)$$

$$Q_i = -|V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.20)$$

Berdasarkan persamaan diatas dari aliran daya dalam sistem yang tidak linier harus diselesaikan dengan metode iterasi.

2.2.3 Aliran dan Rugi-rugi pada Saluran[6]

Gambar 2.5 di bawah ini merupakan ilustrasi sebuah saluran yang menghubungkan bus i dan bus j .



Gambar 2.5 Model saluran transmisi untuk perhitungan aliran pada saluran.

Arus saluran I_{ij} (dengan arah $i \rightarrow j$) ditinjau dari bus i yang ditandai positif, ditunjukkan sebagai berikut :

$$I_{ij} = I_l + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (2.25)$$

Sebaliknya arus saluran I_{ji} (dengan arah $j \rightarrow i$) ditinjau dari bus j yang ditandai negatif, ditunjukkan sebagai berikut:

$$I_{ji} = -I_l + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (2.26)$$

Maka daya kompleks S_{ij} dari bus i ke bus j dan sebaliknya adalah:

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.26)$$

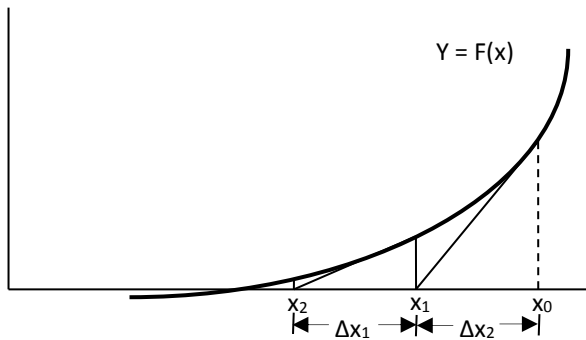
$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.27)$$

Maka rugi-rugi total saluran $i - j$ merupakan penjumlahan aljabar dari persamaan 2.51 dan 2.52.

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.28)$$

2.2.4 Metode Newton Raphson[6]

Gambar 2.6 di bawah ini merupakan ilustrasi metode Newton Raphson.



Gambar 2.6 Diagram ilustrasi metode Newton Raphson.

Untuk sistem tenaga skala besar, metode Newton Raphson lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mendapatkan solusi tidak terikat pada besarnya sistem, tetapi evaluasi yang fungsional lebih dibutuhkan dalam setiap iterasinya. Untuk persamaan Deret Taylor dapat ditulis seperti persamaan dibawah ini:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{1}{1!} \frac{df(x_0)}{dx} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2f(x_0)}{dx^2} (x - x_0)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} (x - x_0)^n = 0 \quad (2.29)$$

Melalui pendekatan linier, dapat disederhanakan menjadi persamaan berikut

$$f(x) = f(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx} (x - x_0) = 0 \quad (2.30)$$

Dimana $\Delta f = f(x) - f(x_0)$ dan $\Delta x = x - x_0$, maka secara umum dapat ditulis menjadi :

$$\frac{df(x)}{dx} \Delta x = \Delta f \quad (2.31)$$

Fungsi dengan 2 variabel yaitu $f_1(x_1, x_2) = 0$ dan $f_2(x_1, x_2) = 0$, dengan memasukkan dalam persamaan (2.31) dapat dinyatakan

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Dalam persamaan aliran daya sebelumnya (2.18)

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.33)$$

Pemisahan bagian ril dan imajiner maka diperoleh daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat diturunkan dari persamaan:

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.34)$$

$$Q_i = -|V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.35)$$

Untuk mengaplikasikan metode Newton Raphson, bentuk persamaan daya pada bus i dinyatakan dalam bentuk polar, sebagai berikut

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |Y_{ij} V_i V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (2.36)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |Y_{ij} V_i V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (2.37)$$

Dimana:

$$Y = G + jB \quad (2.38)$$

$$G = Y \cos \theta, B = Y \sin \theta \quad (2.39)$$

Persamaan diatas digunakan untuk menghitung besar tegangan $|V|$ dan sudut phasa θ . Untuk setiap bus beban terdapat dua persamaan, yaitu (2.36) dan (2.37), dan satu persamaan untuk setiap bus generator, yaitu (2.36). Pengembangan persamaan (2.36) dan (2.37) dalam deret taylor dan mengabaikan urutan atasnya menghasilkan persamaan linier sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}$$

Persamaan diatas adalah persamaan yang digunakan pada setiap iterasi, element jacobian adalah turunan sebagian dari (2.34) dan (2.35) yang ditinjau terhadap $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan $\Delta|V_i^{(k)}|$. Bentuk sederhana dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \frac{\Delta|V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Dimana elemen-elemen matriks jacobian adalah :

$$H = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad (2.41)$$

$$N = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (2.42)$$

$$J = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad (2.43)$$

$$L = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (2.44)$$

Selanjutnya dari perkalian matrik Jacobian diatas, akan diperoleh $\Delta\delta_i$ dan $\Delta|V_i|$ sebagai nilai baru sudut dan magnitude tegangan tiap bus.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (2.45)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (2.46)$$

dimana :

$(k+1)$: jumlah iterasi newton raphson

$\Delta\delta_i$: Perubuaaha sudut tegangan pada bus ke- i

$\Delta|V_i|$: Perubahan magnitude tegangan pada bus ke- i

Proses terus berlanjut sampai $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ lebih kecil dari batas toleransi. Apabila nilai ketelitian telah tercapai, maka proses iterasi

selesai, namun sebaliknya, jika nilai ketelitian belum tercapai maka iterasi akan dilanjutkan.

2.3 Stabilitas Tenaga Listrik[6]

Kemampuan sistem tenaga listrik dalam meningkatkan pemulihan tenaga sama atau lebih besar dari gangguan untuk menjaga titik keseimbangan dikenal sebagai stabilitas sistem. Sistem dikatakan stabil jika sistem menjaga mesin-mesin tetap sinkron dengan peralatan lainnya setelah adanya gangguan.

Permasalahan stabilitas dikaitkan dengan perilaku mesin-mesin sinkron setelah gangguan terjadi. Umumnya masalah stabilitas terbagi menjadi dua kategori, yaitu :

1. Kestabilan keadaan tetap (*Steady-state stability*).
2. Kestabilan transien (*Transient stability*).

2.3.1 Kestabilan Tegangan[7]

Kestabilan tegangan ditinjau dari kemampuan sistem menjaga level tegangan di setiap bus baik keadaan normal maupun setelah terjadi gangguan. Sistem bisa tidak stabil karena adanya gangguan, peningkatan permintaan beban, atau perubahan konfigurasi pada sistem sehingga dapat mengakibatkan penurunan atau kenaikan tegangan pada bus yang melebihi batas yang diizinkan $\pm 5\%$ dari tegangan nominal bus[8].

Penyebab utama yang menyebabkan ketidakstabilan tegangan adalah sistem tenaga tidak dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif. Besarnya kebutuhan daya reaktif dapat memiliki rugi-rugi daya yang besar pada saluran sehingga menimbulkan tegangan jatuh. Tegangan jatuh (*voltage collapse*) adalah fenomena ketidakstabilan tegangan yang muncul akibat adanya kenaikan beban yang sangat besar pada sistem tenaga listrik. Apabila sistem beroperasi berada dibawah level operasi tegangan secara terus menerus akan mengakibatkan pemadaman secara merata (*blackout*). Untuk analisa, kestabilan tegangan diklasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu :

1. *Large-disturbance voltage stability*

Kemampuan sistem dalam mengatur tegangan setelah adanya gangguan besar, seperti kegagalan sistem, lepasnya pembangkit, atau kontigensi konfigurasi sistem. kestabilan ini ditentukan dengan karakteristik beban dan koordinasi pengaman dan kontrol baik secara kontinu maupun sesaat. Analisa dalam stabilitas ini membutuhkan simulasi *long term dynamic*. Kriteria untuk *Large-*

disturbance voltage stability, yaitu terjadinya gangguan dan diikuti respon aksi sistem kontrol, dan tegangan semua bus mencapai level *steady-state*.

2. *Small-disturbance voltage stability*

Kemampuan sistem untuk mengatur tegangan setelah adanya gangguan kecil, seperti kenaikan pembebanan sistem. Stabilitas ini ditentukan dengan karakteristik beban, kontrol kontinu, dan kontrol diskrit pada waktu sesaat. Kriteria untuk *small-disturbance voltage stability*, yaitu semua bus pada sistem dalam kondisi, tegangan bus meningkat seiring dengan kenaikan daya reaktif pada bus yang sama. Sebuah sistem, tegangan bus tidak stabil untuk sedikitnya satu bus jika tegangan bus turun seiring kenaikan daya reaktif pada bus yang sama.

2.3.2 *Kestabilan Transien*[8]

Stabilitas transien adalah kemampuan untuk mencapai titik keseimbangan setelah sistem mengalami gangguan berskala besar dalam dengan asumsi AVR dan generator belum bekerja karena dalam periode transien. Analisis kestabilan transien merupakan analisis paling utama untuk memahami perilaku sistem tenaga seperti gangguan berupa :

1. Perubahan beban secara mendadak akibat terputusnya unit pembangkit.
2. Perubahan pada jaring transmisi, seperti : gangguan hubung singkat atau pemutusan saklar (*switching*).

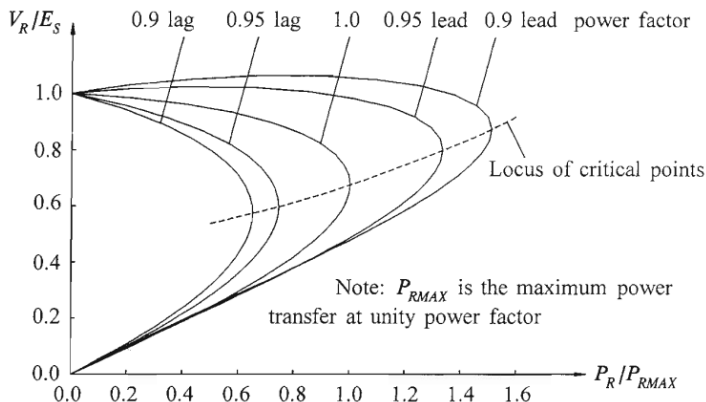
2.4 *Voltage Collapse*[8]

Voltage collapse adalah keadaan yang disebabkan dari serangkaian kejadian menuju titik ketidakseimbangan tegangan yang ditandai dengan profil tegangan rendah dibawah standar diizinkan dalam sebagian besar sistem tenaga. Keadaan ini muncul ketika adanya kenaikan beban yang sangat besar pada sistem tenaga listrik. Dampak besar yang dapat terjadi adalah pemadaman secara merata yang disebut *blackout*. Beberapa gangguan yang dapat mempengaruhi tegangan jatuh atau *voltage collapse*, diantaranya adalah peningkatan beban secara kontinyu.

2.5 *Kurva PV*[9]

Kurva P-V merupakan kurva yang menunjukkan karakteristik level tegangan terhadap perubahan beban daya aktif yang terus meningkat. Kurva ini dihasilkan dengan serangkaian solusi aliran daya untuk

pembebanan yang berbeda-beda. Analisis menggunakan kurva PV ini untuk melihat kondisi tegangan dengan peningkatan pembebanan daya aktif sampai tegangan sistem mengalami *collapse*. Artinya kebutuhan beban daya aktif melebihi kemampuan sistem. Gambar 2.7 merupakan karakteristik kurva PV dengan maksimum daya aktif untuk setiap *power factor* beban yang berbeda, ditunjukkan seperti dibawah ini.



Gambar 2.7 Karakteristik kurva PV[7].

Dimana :

- V_R : Tegangan pada bus penerima.
- E_S : Tegangan pada bus generator.
- P_R : Daya yang ditransfer
- P_{RMAX} : Daya yang ditransfer saat $pf = 1$

Bentuk kurva ini adalah representasi dari bus beban, pada bus *slack* dan bus generator tidak berlaku karena memiliki nilai tegangan yang tetap untuk perubahan beban tertentu.

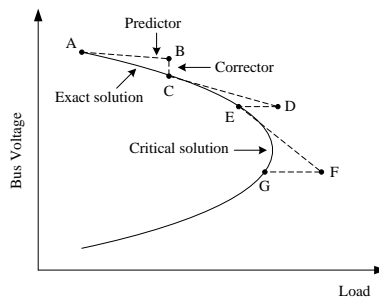
Garis putus-putus pada gambar 2.7 tersebut memperlihatkan titik lokasi yang menyatakan sebagai batas titik kritis. Titik ini menyatakan batas beban pada kondisi *steady-state* untuk stabilitas tegangan jaringan, sedangkan bagian atas dari titik kritis menyatakan kondisi operasi stabil dan di bawah titik kritis menyatakan kondisi operasi tidak stabil.

2.6 Continuation Power Flow (CPF)

Continuation Power Flow merupakan metode perhitungan yang digunakan untuk menunjukkan karakteristik sistem tenaga dari titik ekuilibrium stabil sampai titik kritis atau titik batas kestabilan tegangan berdasarkan penambahan beban[10]. Metode CPF memiliki 2 tahap yang terdiri dari *prediction step* dan *correction step*. Pada metode ini dilakukan reformulasi persamaan aliran daya bertujuan untuk menghindari singularitas *Jacobian matriks* di MLP karena dapat menyebabkan munculnya permasalahan numerik yang sulit.

Continuation Power Flow (CPF) menunjukkan kurva PV dari sistem tenaga listrik dan memungkinkan penentuan *Maximum Loading Parameter* (MLP) dari sistem transmisi dan distribusi[11]. Analisa CPF ini menggunakan proses iterasi yang melibatkan *predictor steps* dan *corrector steps* seperti pada gambar 2.8.

Dasar penyelesaian dengan metode CPF adalah solusi awal dari operasi *load flow* (A), lalu sebuah *tangent predictor* memperkirakan solusi berikutnya (B) dengan kenaikan beban yang telah ditetapkan. Kemudian *corrector steps* menentukan *exact solution* (C) menggunakan analisa aliran daya dengan beban tetap. Nilai tegangan untuk kenaikan beban selanjutnya diprediksi dengan *tangent predictor* yang baru. Jika kenaikan beban yang baru (D) pada *exact solution* berikutnya dekat dengan titik pembebanan maksimum, maka *corrector steps* dengan beban tetap tidak akan konvergen. Oleh karena itu, *corrector steps* dengan tegangan tetap di bus digunakan untuk menentukan *exact solution* (E). Setelah mencapai batas kestabilan tegangan, pembebanan maksimum pada kenaikan beban turun perlahan-lahan selama proses *predictor steps* berturut-turut.



Gambar 2.8 Urutan perhitungan analisa *continuation power flow*[7].

2.6.1 Reformulasi Persamaan Aliran Daya

Pertama, persamaan aliran daya direformulasikan dengan penambahan parameter beban (λ). Untuk simulasi perubahan beban, parameter beban dimasukkan ke daya kebutuhan (*load demand*) yang diekspresikan sebagai berikut.

$$P_{Di} = P_{Dio} + \lambda (P_{\Delta base}) \quad (2.50)$$

$$Q_{Di} = Q_{Dio} + \lambda (Q_{\Delta base}) \quad (2.51)$$

Dimana :

- P_{Di}, Q_{Di} : Kebutuhan daya di bus i
- P_{Dio}, Q_{Dio} : Kebutuhan awal daya di bus i
- $P_{\Delta base}, Q_{\Delta base}$: Perubahan daya yang ditentukan

maka persamaan baru dapat dinyatakan sebagai,

$$F(\theta, V, \lambda) = 0 \quad (2.52)$$

Dimana :

- λ : Parameter beban
- θ : Vektor dari sudut tegangan bus
- V : Vektor dari besar tegangan bus

Dengan batasan parameter beban, $0 < \lambda < \lambda_{critical}$, yaitu $\lambda = 0$ saat pembebanan awal. Kondisi ini dapat diselesaikan dengan *load flow*. Pada $\lambda = \lambda_{critical}$ saat pembebanan kritis. Kemudian, proses kontinuasi dilakukan.

2.6.2 Prediction Step

Pada tahap prediksi ini, pendekatan linier untuk menghitung solusi selanjutnya dengan perubahan dari θ , V , λ . Dari persamaan (2.52) maka diperoleh persamaan linier yang dapat ditulis seperti,

$$F_{\theta} d\theta + F_V dV + F_{\lambda} d\lambda = 0 \quad (2.53)$$

atau

$$[F_\theta + F_V + F_\lambda] \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (2.54)$$

Dengan penambahan λ pada persamaan aliran daya dapat menyebabkan adanya variabel yang tidak diketahui. Oleh karena itu, dilakukan penambahan persamaan untuk mendapatkan solusinya. *Tangent vector* yang memiliki nilai 1 atau -1 akan dimasukan dan membuat matriks jacobian tidak singular pada saat titik kritis, parameter ini dikenal dengan *continuation parameter*. Persamaan (2.54) akan menjadi persamaan baru yang dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} F_\theta + F_V + F_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Pada persamaan (2.55), dimana e_k adalah pendekatan vektor baris dengan semua elemen sama dengan nol kecuali untuk element k^{th} bernilai 1. Ketika *tangent vector* telah didapat, maka solusi selanjutnya dapat ditulis seperti persamaan (2.56).

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

Dengan θ_0, V_0, λ_0 sebagai nilai *state variable* awal saat memulai *predictor step*. *Step size* yang disimbolkan σ , nilainya dipilih sehingga solusi yang diprediksi berada dalam radius konvergensi *corrector*.

2.6.3 Correction Step

Didalam *correction step*, solusi *predictor* akan dikoreksi menggunakan parameterisasi lokal. Persamaan awal dinaikkan dengan satu persamaan yang nilai variabel keadaan tertentu dipilih dan hasilnya sebagai berikut.

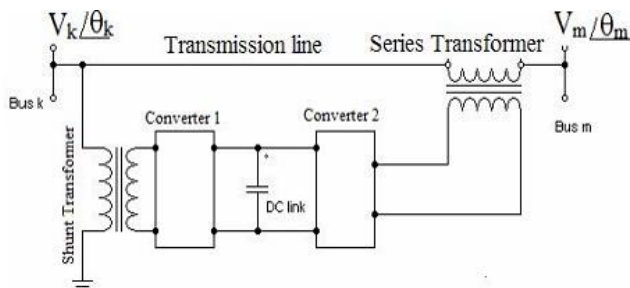
$$\begin{bmatrix} F(\theta, V, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0] \quad (2.57)$$

Dimana x_k adalah *state variable* yang dipilih sebagai *continuation parameter* dan η adalah nilai prediksi *state variable*. Persamaan (2.57) dapat diselesaikan dengan persamaan aliran daya Newton-Raphson.

Contonuation power flow akan berhenti saat titik kritis tercapai. Titik kritis adalah titik dimana pembebanan memiliki nilai maksimum. Setelah titik ini mulai berkurang. Komponen *tangent* dari λ adalah nol pada titik kritis dan negatif di luar titik ini. Oleh karena itu, tanda $d\lambda$ menunjukkan apakah titik kritis sudah tercapai atau tidak.

2.7 Unified Power Flow Controller (UPFC)

UPFC merupakan salah satu peralatan FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission System*). UPFC adalah perangkat yang menggabungkan antara STATCOM dan SSSC, sehingga UPFC dapat mengatur level tegangan dan aliran daya pada bus untuk operasi sistem yang optimal. Hal ini dikarenakan terdapat dua *switching converter* pada UPFC[12]. Gambar 2.9 merupakan ilustrasi skema dasar UPFC yang ditunjukkan seperti di bawah ini.



Gambar 2.9 Skema *Unifield Power Flow Controller* (UPFC)[12].

2.7.1 Dasar Prinsip Kerja UPFC[13,14]

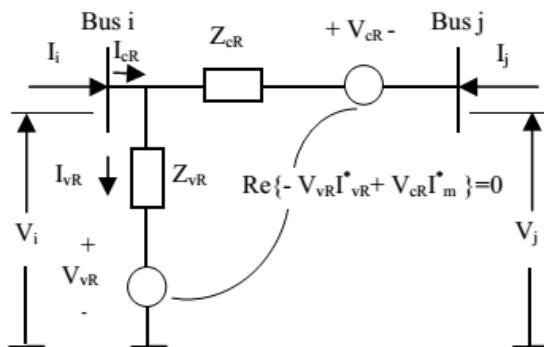
UPFC terdiri dari dua *converter* tersebut dihubungkan menggunakan *DC link*. Fungsi utama konverter adalah mengubah tegangan masukan DC menjadi tegangan keluaran AC yang *magnitude*, frekuensi, dan sudut fasa sesuai yang diinginkan dengan meninjau referensi fasanya. Fungsi dari kopling transformator untuk membatasi UPFC dengan saluran transmisi dan untuk menyesuaikan level tegangan saluran dengan tegangan yang dihasilkan oleh konverter.

Series converter dihubungkan dengan saluran transmisi melalui *series transformer*, sementara *shunt converter* dihubungkan dengan bus melalui *shunt transformer*. Fungsi utama *series converter* pada UPFC dengan menginjeksikan tegangan dan sudut fasa terkontrol pada saluran melalui transformator yang dihubungkan seri. Tegangan yang diinjeksi ini pada dasarnya sebagai sumber tegangan ac sinkron. Arus yang mengalir pada saluran transmisi melewati sumber tegangan ini menghasilkan perubahan daya reaktif dan nyata di terminal antara *series transformer* dan bus penerima.

Sedangkan fungsi dari *shunt converter* adalah untuk mengirim atau menyerap daya nyata yang dibutuhkan oleh *series converter* pada dc link untuk menyokong daya nyata yang dihasilkan dari injeksi tegangan seri. Kebutuhan daya *series converter* di dc link ini diubah kembali menjadi ac oleh *shunt converter* dan dikopel ke bus melalui transformator shunt. Selain kebutuhan daya nyata dari *series converter*, *shunt converter* juga dapat menghasilkan atau menyerap daya reaktif terkontrol, jika diinginkan, dan dengan demikian memberikan kompensasi reaktif shunt untuk saluran tersebut.

2.7.2 Persamaan Aliran Daya UPFC[15]

Gambar 2.10 di bawah ini merupakan model UPFC yang representasikan model *steady-state*. Dua konverter sumber tegangan UPFC dapat dimodelkan sebagai dua sumber tegangan ideal satu dihubungkan seri dan lainnya dihubungkan paralel dibus. Impedansi sumber termasuk dalam model.



Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen UPFC[15]

Persamaan sumber tegangan ideal dinyatakan sebagai berikut.

$$V_{cR} = V_{cR}(\cos\delta_{cR} + j\sin\delta_{cR}) \quad (2.60)$$

$$V_{vR} = V_{vR}(\cos\delta_{vR} + j\sin\delta_{vR}) \quad (2.61)$$

Berdasarkan rangkaian ekivalensi UPFC, persamaan aliran dayanya dapat diturunkan sebagai,

Pada bus i :

$$\begin{aligned} P_i = & V_i^2 G_{ii} + V_i V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \\ & + V_i V_{cR} [G_{ij} \cos(\theta_i - \delta_{cR}) + B_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{cR})] \\ & + V_i V_{vR} [G_{ij} \cos(\theta_i - \delta_{vR}) + B_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{vR})] \end{aligned} \quad (2.62)$$

$$\begin{aligned} Q_i = & -V_i^2 B_{ii} + V_i V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \\ & + V_i V_{cR} [G_{ij} \cos(\theta_i - \delta_{cR}) - B_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{cR})] \\ & + V_i V_{vR} [G_{ij} \cos(\theta_i - \delta_{vR}) - B_{ij} \sin(\theta_i - \delta_{vR})] \end{aligned} \quad (2.63)$$

Pada bus j :

$$\begin{aligned} P_j = & V_j^2 G_{jj} + V_i V_j [G_{ji} \cos(\theta_j - \theta_i) + B_{ji} \sin(\theta_j - \theta_i)] \\ & + V_j V_{cR} [G_{jj} \cos(\theta_j - \delta_{cR}) + B_{jj} \sin(\theta_j - \delta_{cR})] \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} Q_j = & -V_j^2 B_{jj} + V_i V_j [G_{ji} \cos(\theta_j - \theta_i) - B_{ji} \sin(\theta_j - \theta_i)] \\ & + V_j V_{cR} [G_{jj} \cos(\theta_j - \delta_{cR}) - B_{jj} \sin(\theta_j - \delta_{cR})] \end{aligned} \quad (2.65)$$

Series converter :

$$\begin{aligned} P_{cR} = & V_{cR}^2 G_{ii} + V_i V_{cR} [G_{ij} \cos(\delta_{cR} - \theta_i) + B_{ij} \sin(\delta_{cR} - \theta_i)] \\ & + V_j V_{cR} [G_{jj} \cos(\delta_{cR} - \theta_j) + B_{jj} \sin(\delta_{cR} - \theta_j)] \end{aligned} \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} Q_{cR} = & -V_{cR}^2 B_{jj} + V_i V_{cR} [G_{ij} \cos(\delta_{cR} - \theta_i) - B_{ij} \sin(\delta_{cR} - \theta_i)] \\ & + V_j V_{cR} [G_{jj} \cos(\delta_{cR} - \theta_j) - B_{jj} \sin(\delta_{cR} - \theta_j)] \end{aligned} \quad (2.67)$$

Shunt converter :

$$P_{vR} = -V_{vR}^2 G_{vR} + V_i V_{vR} [G_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_i) + B_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_i)] \quad (2.68)$$

$$Q_{vR} = V_{vR}^2 G_{vR} + V_i V_{vR} [G_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_i) - B_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_i)] \quad (2.69)$$

Dimana,

$$G_{ii} + jB_{ii} = Z_{cR}^{-1} + Z_{vR}^{-1} \quad (2.70)$$

$$G_{jj} + jB_{jj} = Z_{cR}^{-1} \quad (2.71)$$

$$G_{ij} + jB_{ij} = -Z_{cR}^{-1} \quad (2.72)$$

$$G_{vR} + jB_{vR} = -Z_{vR}^{-1} \quad (2.73)$$

2.7.3 Batasan Operasi UPFC[15]

Magnitude dan sudut fasa dari sumber tegangan konverter seri dan paralel dibatasi dengan,

$$V_{cR}^{min} \leq V_{cR} \leq V_{cR}^{max} \quad (2.74)$$

$$0 \leq \theta_{cR} \leq 2\pi \quad (2.75)$$

$$V_{vR}^{min} \leq V_{vR} \leq V_{vR}^{max} \quad (2.76)$$

$$0 \leq \theta_{vR} \leq 2\pi \quad (2.77)$$

Dimana,

- V_{cR}^{min} : Batas minimal tegangan V_{cR}
- V_{cR}^{max} : Batas maksimal tegangan V_{cR}
- V_{vR}^{min} : Batas minimal tegangan V_{vR}
- V_{vR}^{max} : Batas maksimal tegangan V_{vR}

Mengasumsikan tidak ada rugi-rugi konverter, daya aktif yang di kirim *shunt converter* P_{vR} sama dengan permintaan daya aktif pada *series converter* sehingga dapat dinyatakan,

$$P_{vR} + P_{cR} = 0 \quad (2.78)$$

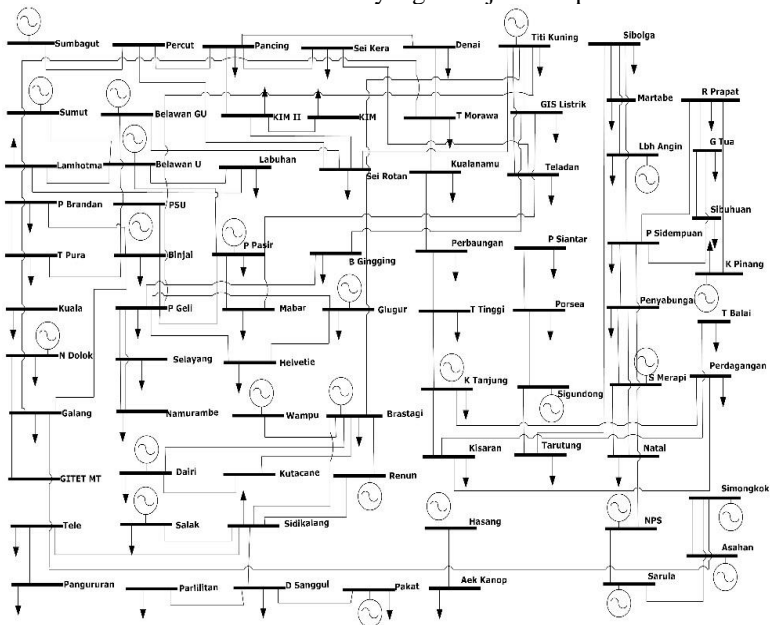
Dimana,

$$P_{vR} = V_{vR} I_{vR}^* \quad \text{dan} \quad P_{cR} = V_{cR} I_{cR}^* \quad (2.79)$$

PEMODELAN SISTEM

3.1 Sistem Kelistrikan Sumatera Utara 150kV dan 275kV

Objek penelitian yang digunakan untuk analisa stabilitas tegangan adalah sistem interkoneksi kelistrikan Provinsi Sumatera Utara 150kV dan 275kV. Gambar 3.1 merupakan *single line diagram* sistem kelistrikan Sumatera Utara 150kV dan 275kV yang ditunjukkan seperti di bawah ini.



Gambar 3.1 *Single line diagram* sistem kelistrikan Sumatera Utara 150kV dan 275kV

Pada *single line diagram* gambar 3.1, data saluran yang digunakan dalam pemodelan sistem terdiri dari dua level tegangan yaitu 150kV dan 275kV. Dimana impedansi base ($Z_B = 225 \Omega$) dan admitansi base ($Y_B = 0,0044 \text{ S}$) untuk tegangan 150kV sedangkan impedansi base ($Z_B = 756.25 \Omega$) dan admitansi base ($Y_B = 0,00132 \text{ S}$) untuk tegangan 275kV. Data saluran dan bus ditunjukkan pada tabel 3.1 dan tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.1 Data saluran sistem kelistrikan Sumatera Utara 150 kV

No	Transmisi		R (pu)	X (pu)	B (pu)
	Dari Bus	Ke Bus			
1	Kualanamu	Perbaungan	0.0019	0.0063	0.02032
2	Paya Geli	Namurambe	0.00113	0.03342	0.00387
3	P. Sidempuan	N. P. Sidempuan	0.0002	0.0012	0.00422
4	Parlilitan	Dolok Sanggul	0.0095	0.04572	0.00101
5	Percut	Sei Rotan	0.0002	0.0012	0.08509
6	Mabar	KIM	0.00362	0.01355	0.00486
7	Natal	S. Merapi	0.00179	0.03044	0.01014
8	Paya Geli	Glugur	0.00018	0.00281	0.07441
9	Selayang	Namurambe	0.00036	0.00115	0.00405
10	Titi Kuning	Sei Rotan	0.00262	0.00983	0.07599
11	Sei Kera	Pancing	0.0033	0.01412	1.822
12	KIM	KIM II	0.00206	0.00883	0.00326
13	Sumut	Belawan PLTU	0.0004	0.0013	0.07406
14	Binjai	Paya Geli	0.00143	0.00781	0.02913
15	Tele	Pangururan	0.0049	0.0122	0.00819
16	Panyabungan	P. Sidempuan	0.0077	0.0789	0.02709
17	Labuhan Bilik	Rantau Prapat	0.0124	0.0407	0.132
18	Martabe	P. Sidempuan	0.01381	0.0841	0.02259
19	K. Tanjung	Kisaran	0.01024	0.033	0.11587
20	Helvetie	Glugur	0.00153	0.00571	0.00805
21	Porsea	P. Siantar	0.00965	0.03109	0.10918
22	Pancing	Denai	0.0033	0.01413	0.7622
23	Pancing	KIM II	0.00205	0.01075	0.0832
24	Percut	KIM	0.0002	0.0012	0.03509
25	Sei Rotan	T. Tinggi	0.02219	0.09512	0.23967
26	Belawan PLTU	Labuhan	0.00212	0.05401	0.00186

Tabel 3.1 Data saluran sistem kelistrikan Sumatera Utara 150 kV
(lanjutan)

No	Transmisi		R (pu)	X (pu)	B (pu)
	Dari Bus	Ke Bus			
27	P. Brandan	P. Susu	0.00111	0.00332	0.02093
28	Wampu	Brastagi	0.00716	0.02308	0.08101
29	K.Cane (NAD)	Dairi	0.07515	0.19188	0.06622
30	Paya Pasir	Belawan TU	0.00014	0.00579	0.00897
31	Sumbagut	Percut	0.0002	0.0012	0.01528
32	Kuala	Binjai	0.0017	0.0056	0.01828
33	Galang	T. Morawa	0.0011	0.0061	0.08108
34	Sei Kera	Teladan	0.00091	0.00343	0.01228
35	T. Tinggi	G. Para	0.0043	0.01385	0.0986
36	G. Tua	R. Prapat	0.05672	0.14467	0.04986
37	Galang	Namurambe	0.0046	0.0242	0.08432
38	A. Kanopan	Kisaran	0.0004	0.0013	0.00406
39	K. Tanjung	Perdagangan	0.0241	0.0793	0.02584
40	T. Tinggi	K. Tanjung	0.01024	0.033	0.11587
41	Perbaungan	T. Tinggi	0.03088	0.0787	0.0471
42	Sipan 1	Sipan 2	0.0008	0.00145	0.04933
43	D. Sanggul	Pakat	0.00627	0.06423	0.01418
44	Sei Kera	Denai	0.02463	0.01413	0.00522
45	Percut	Pancing	0.0011	0.0061	0.06638
46	Sibuhuan	G. Tua	0.0171	0.0563	0.1828
47	D.Sanggul	Tarutung	0.05807	0.01539	0.00239
48	Paya Pasir	Paya Geli	0.00324	0.01215	0.01435
49	Mabar	GIS Listrik	0.00091	0.00343	0.07228
50	Tarutung	Sidikalang	0.00458	0.01714	0.06143
51	Denai	Sei Rotan	0.00822	0.02094	0.06821
52	Belawan TU	Lamhotma	0.00431	0.01099	0.0378
53	Brastagi	Sidikalang	0.00459	0.0117	0.04032
54	Renun 1,2	Brastagi	0.03633	0.09258	0.00319
55	Belawan GU	Sei Rotan	0.00547	0.03292	0.00743

Tabel 3.1 Data saluran sistem kelistrikan Sumatera Utara 150 kV (lanjutan)

No	Transmisi		R (pu)	X (pu)	B (pu)
	Dari Bus	Ke Bus			
56	Mabar	Paya Pasir	0.00153	0.00571	0.02048
57	Paya Geli	Titi Kuning	0.00465	0.01741	0.06376
58	P. Susu	Binjai	0.00715	0.03916	0.14634
59	Paya Pasir	Sei Rotan	0.03618	0.01356	0.14857
60	Labuhan	Lamhotma	0.00272	0.00692	0.00171
61	Dairi	Brastagi	0.05379	0.13718	0.00473
62	Brastagi	K. Cane (NAD)	0.01223	0.06711	0.00252
63	Renun 1,2	Sidikalang	0.01817	0.04629	0.00159
64	Selayang	Paya Geli	0.00036	0.00115	0.00405
65	Batu Gingging	GIS Listrik	0.00051	0.0028	0.01046
66	Tanjung Pura	P. Brandan	0.00451	0.01382	0.03139
67	Tele	Sidikalang	0.029	0.0739	0.02542
68	Panyabungan	Natal	0.00895	0.09173	0.03151
69	P. Siantar	Tanah Jawa	0.00269	0.08657	0.30376
70	G. Tua	P. Sidempuan	0.03511	0.08949	0.03081
71	Tarutung	Tele	0.05846	0.14912	0.0514
72	Rantau Prapat	P. Sidempuan	0.04453	0.16038	0.11186
73	Rantau Prapat	Kota Pinang	0.01045	0.03369	0.1183
74	A. Kanopan	Rantau Prapat	0.0004	0.0013	0.00406
75	Hasang 1	AEK Kanopan	0.0004	0.0013	0.00406
76	Kisaran	Tanjung Balai	0.0057	0.0141	0.02061
77	Kisaran	Rantau Prapat	0.03633	0.1307	0.09103
78	Kisaran	Perdagangan	0.0241	0.0793	0.02584
79	Sibolga	P. Sidempuan	0.01268	0.04084	0.0446
80	Sibolga	Martabe	0.0063	0.06423	0.02048
81	Sipan 2	Sibolga	0.00563	0.01433	0.00493
82	Sipan 1	Sibolga	0.00563	0.01433	0.00493
83	Sibolga	Labuhan Angin	0.00516	0.05286	0.00104
84	P. Brandan	Binjai	0.00091	0.02929	0.22076

Tabel 3.1 Data saluran sistem kelistrikan Sumatera Utara 150 kV
(lanjutan)

No	Transmisi		R (pu)	X (pu)	B (pu)
	Dari Bus	Ke Bus			
85	Tele	Dolok Sanggul	0.02895	0.07196	0.00239
86	Titi Kuning	Teladan	0.00076	0.00286	0.01046
87	T. Morawa	Kualanamu	0.00249	0.00803	0.09819
88	Titi Kuning	Brastagi	0.00937	0.0301	0.10947
89	Denai	T. Morawa	0.00801	0.02041	0.00703
90	Porsea	Simangkok	0.00042	0.00632	0.00099
91	Titi Kuning	Namurambe	0.0019	0.00711	0.02603
92	Paya Geli	Helvetie	0.00153	0.00601	0.02197
93	Tarutung	Porsea	0.01104	0.03558	0.00125
94	Tarutung	Sibolga	0.00886	0.09085	0.00312
95	Tanjung Pura	Binjai	0.00451	0.01381	0.03139
96	Tarutung	Sigundong	0.00842	0.02712	0.00296
97	Negeri Dolok	Galang	0.00338	0.0185	0.00691
98	P. Siantar	G. Para	0.0043	0.01385	0.0486
99	Panyabungan	S Merapi	0.00179	0.01836	0.0063
100	Belawan GU	Binjai	0.00355	0.01936	0.02204
101	Sidikalang	D. Sanggul	0.04521	0.11526	0.00397
102	Salak	Sidikalang	0.0114	0.0283	0.00412
103	GIS Listrik	Titi Kuning	0.00121	0.00453	0.04659
104	Sei Rotan	Perbaungan	0.03088	0.0787	0.02709
105	T. Morawa	Sei Rotan	0.00558	0.01421	0.1889
106	KIM II	Sei Rotan	0.0103	0.04414	0.01631
107	Sei Rotan	KIM	0.01236	0.05296	0.01958
108	Batu Gingging	Paya Geli	0.00103	0.00561	0.06427

Tabel 3.2 Data saluran sistem interkoneksi Sumatera Utara 275 kV

No	Transmisi		R (pu)	X (pu)	B (pu)
	Dari Bus	Ke Bus			
1	P Susu	GITET M. Barat	0.00183	0.01	0.42214
2	Binjai	Galang	0.00273	0.01498	0.63348
3	Galang	GITET M Timur	0.00061	0.00334	0.14067
4	Sarulla	N.P. Sidempuan	0.0021	0.03884	0.1514
5	Sarulla	Rantau Prapat	0.00334	0.05988	0.02332
6	R. Prapat	Perdagangan	0.00453	0.02492	1.0573
7	Sumbagut	GITET M Timur	0.00046	0.0025	0.1055
8	GITET M Timur	GITET M.Barat	0.00061	0.00334	0.14067
9	Asahan TA	Simangkok	0.01128	0.29949	0.00198
10	Simangkok	Galang	0.00476	0.02628	0.11815
11	Sarulla	Simangkok	0.00294	0.05282	0.02129

3.2 Klasifikasi Bus pada Sistem Kelistrikan Sumatera Utara 150kV dan 275kV

Pada *single line diagram* Sistem interkoneksi Sumatera Utara 150kV dan 275kV, bus-bus yang digunakan dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *Slack bus* (1 bus) yaitu bus Belawan PLTGU yang merupakan pembangkit listrik tenaga uap, pada *slack bus* magnitud tegangan dan sudut phase sudah ditetapkan.
2. *Generator bus* (28 bus) yaitu Belawan PLTU, Brastagi, Dairi, Glugur, Hasang 1, Kuala Tanjung, Kota Pinang, Labuhan Angin, Negeri Dolok, New Padang Sidempuan, Pangkalan Susu, Pakat, Parlilitan, Paya Pasir, PLTA Asahan 3, PLTP Sorik Merapi, Renun 1-2, Salak, Sarulla, Sigundong, Simangkok, Sipan 1, Sipan 2, Sumbagut 1,3,4, Sumut, Tanah Jawa, Titi Kuning, Wampu.
3. *Load bus* (46 bus) yaitu AEK Kanopan, Batu Gingging, Binjai, Denai, Dolok Sanggul, Gunung Para, Gunung Tua, Galang, GIS Listrik, Helvetie, KIM, KIM II, Kisaran, Kuala, Kualanamu, Labuhan, Labuhan Bilik, Lamhotma, Mabar, Martabe, Namurambe, Natal, Pangkalan Brandan, Pematang Siantar, Padang Sidempuan, Pancing, Pangururan, Panyabungan, Paya Geli, Perbaungan, Perdagangan, Porsea, Rantau Prapat, Sei Kera,

Sei Rotan, Selayang, Sibolga, Sibuhuan, Sidikalang, Tanjung Morawa, Tebing Tinggi, Tanjung Balai, Tanjung Pura, Tarutung, Teladan, Tele.

Untuk perencanaan single line diagram, data pembangkitan dan data bus yang digunakan dalam pemodelan sistem seperti yang ditunjukkan tabel 3.3. Dimana MVA base ($MVA_B = 100 \text{ MVA}$) dan tegangan base ($V_B = 150 \text{ kV}$) untuk tegangan 150 kV dan tegangan base ($V_B = 275 \text{ kV}$) untuk tegangan 275 kV .

Tabel 3.3 Data pembangkitan dan beban sistem interkoneksi Sumatera Utara 150 kV dan 275 kV

No Bus	Type Bus	Nama Bus	Beban		Pembangkit			Shunts Mvar
			P	Q	P	Qmin	Qmax	
			MW	MVar	MW	MVar	MVar	
1	PQ	AEK Kanopan	26.08	12.63				
2	PQ	Batu Gingging	193.2	93.57				
3	PV	Belawan PLTU			220	-97.44	149.88	
4	Slack	Belawan PTLGU			900	-374.76	578.52	
5	PQ	Binjai	83.41	40.4				
6	PV	Brastagi	55.31	26.79	10	-4.84	7.45	
7	PV	Dairi	8.58	4.16	43.5	-21.32	32.8	
8	PQ	Denai	91.77	44.45				
9	PQ	Dolok Sanggul	2.93	1.42				
10	PQ	G. Para	18.41	8.92				
11	PQ	G. Tua	12.63	6.12				
12	PQ	Galang	14.12	6.84				50
13	PQ	GIS Listrik	132.49	64.17				
14	PV	Glugur	91.66	44.39	32.7	-20.06	30.87	
15	PV	Hasang 1			40	-20.02	30.81	
16	PQ	Helvetie	136.88	66.29				
17	PV	K. Tanjung	48.18	23.33	90	-38.51	59.25	
18	PQ	KIM	202.02	97.84				
19	PQ	KIM II	105.41	51.05				
20	PQ	Kisaran	56.53	27.38				
21	PV	Kota Pinang	51.21	24.8	116	-46.73	71.89	
22	PQ	Kuala	31.51	15.26				
23	PQ	Kualanamu	88.86	43.04				

Tabel 3.3 Data pembangkitan dan beban sistem interkoneksi Sumatera Utara 150 kV dan 275 kV (lanjutan)

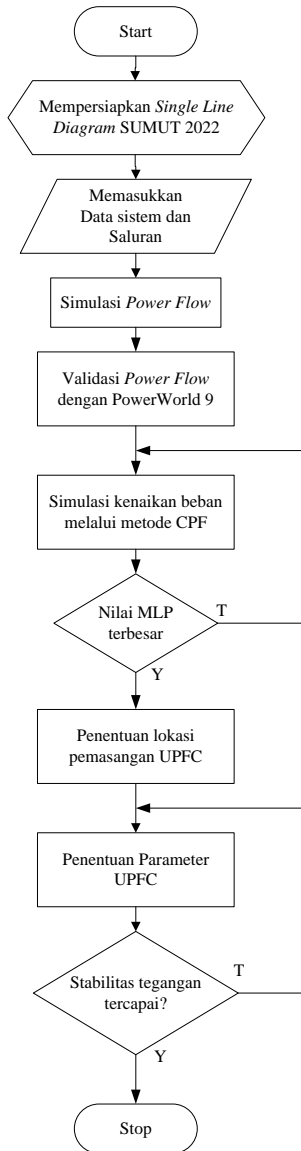
No Bus	Tipe Bus	Nama Bus	Beban		Pembangkit			Shunts Mvar
			P	Q	P	Qmin	Qmax	
			MW	MVar	MW	MVar	MVar	
24	PQ	Labuhan	56.42	27.33				
25	PV	Labuhan Angin	4.2	2.03	230	-105.46	162.26	
26	PQ	Labuhan Bilik	19.89	9.63				
27	PQ	Lamhotma	60.15	29.13				
28	PQ	Mabar	66.93	32.42				
29	PQ	Martabe	6.46	3.13				
30	PQ	Namurambe	83.71	40.54				
31	PQ	Natal	6.5	3.15				
32	PV	Negeri Dolok	4.16	2.01	32.2	-15.84	24.37	
33	PV	New P. Sidempuan			100	-48.4	74.46	
34	PQ	P. Brandan	56.07	27.16				
35	PQ	P. Siantar	95.31	46.16				
36	PQ	P. Sidempuan	61.97	30.01				
37	PV	P. Susu			840	-388.38	597.52	
38	PV	Pakat	4.47	2.16	10	-14.36	22.1	
39	PQ	Pancing	145.8	70.61				
40	PQ	Pangururan	8.44	4.09				
41	PQ	Panyabungan	13.17	6.38				
42	PV	Parlilitan	0.44	0.21	51.4	-25.26	38.86	
43	PQ	Paya Geli	194.52	94.21				
44	PV	Paya Pasir	72.98	35.35	26.5	-13.23	20.35	
45	PQ	Perbaungan	45.66	22.11				
46	PQ	Perdagangan	132.23	64.04				
47	PV	PLTA Asahan 3			174	-83.94	129.14	
48	PV	PLTP S Merapi			240	-105.53	162.36	
49	PQ	Porsea	13.94	6.75				
50	PQ	Rantau Prapat	97.82	47.38				
51	PV	Renun 1,2			82	-33.94	52.24	
52	PV	Salak	2.09	1.01	48	-23.36	35.95	
53	PV	Sarulla			440	-217.04	333.88	
54	PQ	Sei Kera	108.51	52.55				
55	PQ	Sei Rotan	110.15	53.35				

Tabel 3.3 Data pembangkitan dan beban sistem interkoneksi Sumatera Utara 150 kV dan 275 kV (lanjutan)

No Bus	Tipe Bus	Nama Bus	Beban		Pembangkit			Shunts Mvar
			P	Q	P	Qmin	Qmax	
			MW	MVar	MW	MVar	MVar	
56	PQ	Selayang	127.68	61.84				
57	PQ	Sibolga	40.03	19.39				
58	PQ	Sibuhuan	19.47	9.43				
59	PQ	Sidikalang	17.63	8.54				
60	PV	Sigundong			70	-16.22	24.95	
61	PV	Simangkok			180	-81.2	124.9	
62	PV	Sipan 1			33	-16.11	24.78	
63	PV	Sipan 2			17	-8.08	12.44	
64	PV	Sumbagut 1,3,4			750	-275.04	423.18	
65	PV	Sumut			600	-145.2	223.4	
66	PQ	T. Morawa	92.62	44.86				
67	PQ	T. Tinggi	79.04	38.28				
68	PV	Tanah Jawa	32.94	15.95	67.3	-33.84	52.06	
69	PQ	Tanjung Balai	79.69	38.6				50
70	PQ	Tanjung Pura	52.64	25.49				
71	PQ	Tarutung	46.36	22.45				
72	PQ	Teladan	193.57	93.75				
73	PQ	Tele	1.02	0.49				
74	PV	Titi Kuning	130.83	63.36	24.8	-10.01	15.4	
75	PV	Wampu			40	-22.11	34.03	

3.3 Analisa Kestabilan Tegangan

Dalam tugas akhir ini, analisa kestabilan tegangan dengan simulasi yang dilakukan menggunakan bantuan *software Power System Analysis Toolbox* (PSAT) versi 2.1.8. Kestabilan tegangan dapat diamati melalui kurva PV yang menunjukkan kondisi nilai tegangan bus disetiap penambahan beban secara kontinu dengan metode *Continuation Power Flow* (CPF). Metode ini terdiri dari langkah prediksi dan koreksi yang merupakan langkah solusi untuk menentukan kenaikan parameter pembebanan λ (faktor pengali kenaikan beban). jika melebihi titik kritis atau maksimum parameter pembebanan dapat dinyatakan ketidakstabilan kondisi operasi sistem tenaga listrik. Berikut gambar 3.2 yang menunjukkan diagram alir metodologi penelitian yang digunakan.



Gambar 3.2 Diagram alir metodologi penelitian

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil simulasi dan analisa kestabilan tegangan pada sistem interkoneksi Sumatera Utara 150kV dan 275kV tahun 2022. Data yang digunakan pada simulasi ini adalah data saluran (*line data*), data pembangkitan (*generation data*), dan data beban (*load data*) sistem kelistrikan Sumatera Utara saat beban puncak (*peak load*) tahun 2022 dengan jumlah total beban yang terpasang adalah 3836.7 MW dan 1858.18 MVAR. Kestabilan tegangan bus dapat dianalisis melalui simulasi penambahan beban secara kontinu dengan metode *Continuation Power Flow* (CPF) tanpa mempertimbangkan rating peralatan. Bus yang mengalami drop tegangan paling besar dari kondisi awal operasi dan kemiringan kurva PV saat mencapai kondisi *Maximum Loading Parameter* (MLP) digunakan sebagai pemilihan lokasi pemasangan UPFC. Hasil simulasi penambahan beban dengan metode CPF akan dipilih 4 bus yang paling kritis. Analisa ini dilakukan saat kondisi sebelum dan sesudah pemasangan UPFC. Dengan pemasangan UPFC akan berdampak pada kestabilan tegangan sistem yaitu memperbaiki profil tegangan, mengurangi daya pembangkitan sistem, meminimalkan *losses* sistem, dan menjadikan sistem tidak mudah mengalami drop tegangan saat terjadi kenaikan beban secara kontinyu.

4.1 Simulasi dan Analisis *Power Flow* pada Sistem Kelistrikan

Simulasi yang digunakan pada tugas akhir adalah dengan menggunakan *software* PSAT 2.1.8 berbasis MATLAB. Simulasi sistem tenaga listrik ini dengan menggunakan metode Newton Raphson dalam perhitungan aliran daya sistem kelistrikan untuk mengetahui kondisi tegangan bus pada operasi normal sistem. Tabel 4.1 di bawah ini menunjukkan hasil running *power flow* PSAT 2.1.8.

Tabel 4.1 Hasil simulasi *power flow* bus sistem 150kV dan 275kV

No Bus	Tipe Bus	V (pu)	θ (deg)	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
1	PQ	0.98714	-7.71	26.08	12.63	0	0
2	PQ	0.96895	-6.33	193.2	93.57	0	0

Tabel 4.1 Hasil simulasi *power flow* bus sistem 150kV dan 275kV
(lanjutan)

No Bus	Tipe Bus	V (pu)	θ (deg)	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
3	PV	0.99718	-2.97	0	0	170.67	149.88
4	Slack	1	0.00	0	0	612.01	44.56
5	PQ	0.98226	-3.41	83.41	40.4	0	0
6	PV	0.99095	-4.53	55.31	26.79	8.85	7.45
7	PV	1	-3.99	8.58	4.16	20.92	5.29
8	PQ	0.98282	-6.60	91.77	44.45	0	0
9	PQ	0.99763	-3.34	2.93	1.42	0	0
10	PQ	0.97863	-7.26	18.41	8.92	0	0
11	PQ	0.98752	-2.66	12.63	6.12	0	0
12	PQ	0.99139	-5.46	14.12	6.84	0	0
13	PQ	0.97192	-6.22	132.49	64.17	0	0
14	PV	0.96904	-6.11	91.66	44.39	31.63	30.87
15	PV	0.98768	-7.70	0	0	32.72	30.81
16	PQ	0.96662	-6.24	136.88	66.29	0	0
17	PV	0.98920	-8.08	48.18	23.33	60.41	59.25
18	PQ	0.98758	-5.91	202.02	97.84	0	0
19	PQ	0.98361	-6.36	105.41	51.05	0	0
20	PQ	0.98651	-7.85	56.53	27.38	0	0
21	PV	1	-6.90	51.21	24.8	93.42	43.33
22	PQ	0.98088	-3.50	31.51	15.26	0	0
23	PQ	0.97798	-6.69	88.86	43.04	0	0
24	PQ	0.98711	-3.61	56.42	27.33	0	0
25	PV	1.01	5.96	4.2	2.03	129.85	15.67
26	PQ	0.98360	-8.03	19.89	9.63	0	0
27	PQ	0.98879	-3.48	60.15	29.13	0	0
28	PQ	0.97818	-5.78	66.93	32.42	0	0
29	PQ	0.99818	2.06	6.46	3.13	0	0

Tabel 4.1 Hasil simulasi *power flow* bus sistem 150kV dan 275kV
(lanjutan)

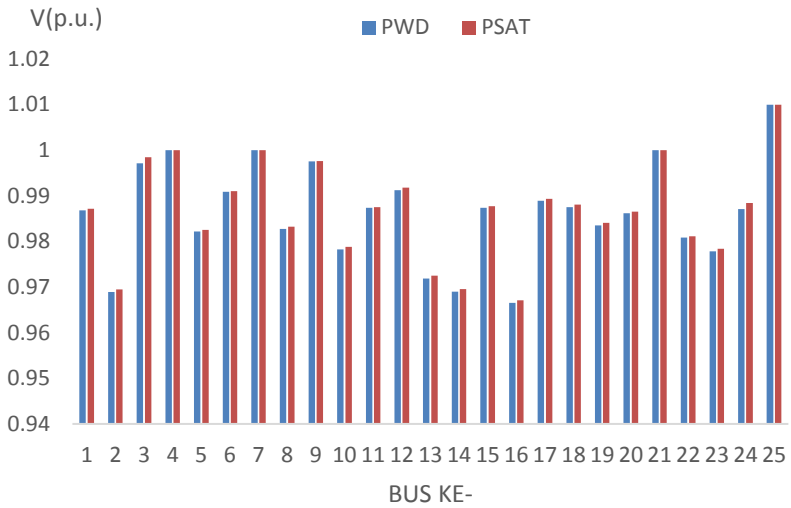
No Bus	Tipe Bus	V (pu)	θ (deg)	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
30	PQ	0.97066	-6.12	83.71	40.54	0	0
31	PQ	0.99900	11.08	6.5	3.15	0	0
32	PV	0.99630	-5.29	4.16	2.01	24.8	24.37
33	PV	1	2.19	0	0	77.42	27.71
34	PQ	0.99371	-0.89	56.07	27.16	0	0
35	PQ	0.97980	-6.72	95.31	46.16	0	0
36	PQ	0.99950	2.14	61.97	30.01	0	0
37	PV	1	-0.20	0	0	639.7	72.09
38	PV	1	-3.28	4.47	2.16	6.46	4.99
39	PQ	0.98568	-6.46	145.8	70.61	0	0
40	PQ	0.99395	-3.73	8.44	4.09	0	0
41	PQ	0.99735	9.89	13.17	6.38	0	0
42	PV	1	-2.82	0.44	0.21	20.56	1.25
43	PQ	0.97038	-5.94	194.52	94.21	0	0
44	PV	0.98757	-4.81	72.98	35.35	23.88	20.35
45	PQ	0.97687	-6.82	45.66	22.11	0	0
46	PQ	0.97990	-9.53	132.23	64.04	0	0
47	PV	1	22.85	0	0	123.93	18.80
48	PV	1	11.59	0	0	189.93	2.03
49	PQ	0.99446	-3.69	13.94	6.75	0	0
50	PQ	0.98751	-7.58	97.82	47.38	0	0
51	PV	1	-3.45	0	0	38.25	6.07
52	PV	1	-3.55	2.09	1.01	25.42	9.95
53	PV	1	3.19	0	0	239.86	4.38
54	PQ	0.97484	-6.81	108.51	52.55	0	0
55	PQ	0.98775	-5.78	110.15	53.35	0	0
56	PQ	0.96991	-6.07	127.68	61.84	0	0

Tabel 4.1 Hasil simulasi *power flow* bus sistem 150kV dan 275kV
(lanjutan)

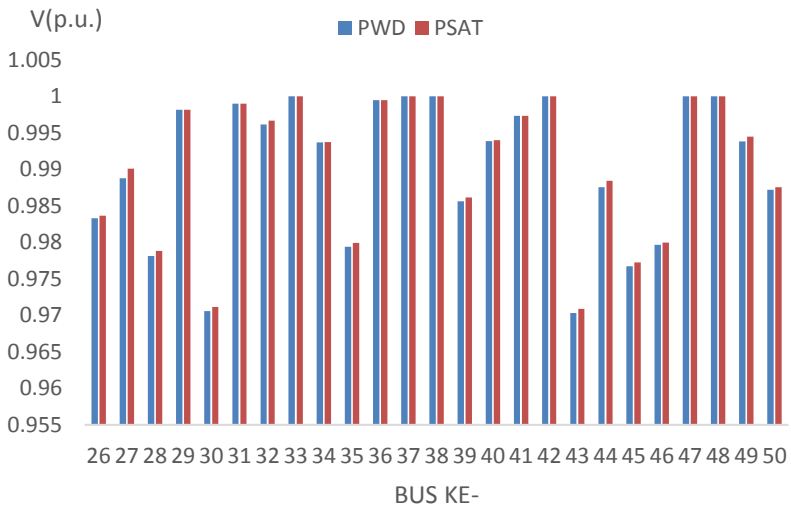
No Bus	Tipe Bus	V (pu)	θ (deg)	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
57	PQ	0.99865	2.22	40.03	19.39	0	0
58	PQ	0.98370	-3.30	19.47	9.43	0	0
59	PQ	0.99477	-3.87	17.63	8.54	0	0
60	PV	1	-2.83	0	0	28	8.65
61	PV	1	1.20	0	0	87.33	52.52
62	PV	1	2.31	0	0	13.2	1.54
63	PV	1	2.31	0	0	12.86	1.72
64	PV	0.99688	-5.33	0	0	607.03	423.18
65	PV	1	-2.61	0	0	499.85	61.29
66	PQ	0.98484	-6.16	92.62	44.86	0	0
67	PQ	0.97861	-7.64	79.04	38.28	0	0
68	PV	1	-7.06	32.94	15.95	26.92	24.73
69	PQ	0.98329	-8.55	79.69	38.6	0	0
70	PQ	0.98494	-2.33	52.64	25.49	0	0
71	PQ	0.99528	-3.23	46.36	22.45	0	0
72	PQ	0.97158	-6.71	193.57	93.75	0	0
73	PQ	0.99485	-3.68	1.02	0.49	0	0
74	PV	0.97318	-6.33	130.83	63.36	20.94	15.40
75	PV	1	-4.28	0	0	27.67	26.61

Dari hasil perhitungan aliran daya pada tabel 4.1 dapat diamati bahwa pada kondisi awal normal profil tegangan setiap bus masih berada pada batas toleransi tegangan operasi $\pm 5\%$ saat sebelum penambahan beban secara kontinyu. Sedangkan total daya pembangkitan dan daya beban adalah 3894,54 MW dan 3836.7 MW, serta rugi-rugi daya pada kondisi normal adalah 57.89 MW.

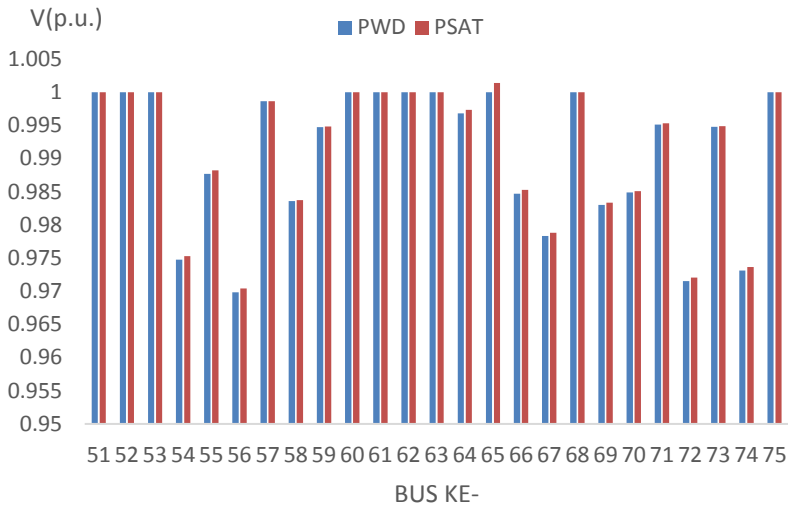
Adapun gambar 4.1 menunjukkan perbandingan profil tegangan bus hasil simulasi *power flow* menggunakan *software* PSAT 2.1.8 dengan Power World 9.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.1 Grafik perbandingan profil tegangan (a)bus 1-25, (b)bus 26-50, (c)bus 51-75

Dari plot grafik perbandingan profil tegangan bus hasil simulasi menggunakan PSAT 2.1.8 dan PowerWorld 9 pada gambar 4.1 didapatkan bahwa magnitud tegangan dengan *mismatch* terbesar pada bus 65 sebesar 0,0014 p.u, sedangkan magnitud tegangan dengan *mismatch* terkecil pada bus 25,31,47,48 sebesar 0,00001 p.u, sehingga validasi hasil simulasi *power flow* menggunakan PSAT 2.1.8 PowerWorld 9 terbukti mendekati sama dengan persentase *mismatch* profil tegangan sebesar 0,001-0,14%.

4.2 Analisa Stabilitas Tegangan sebelum Pemasangan UPFC

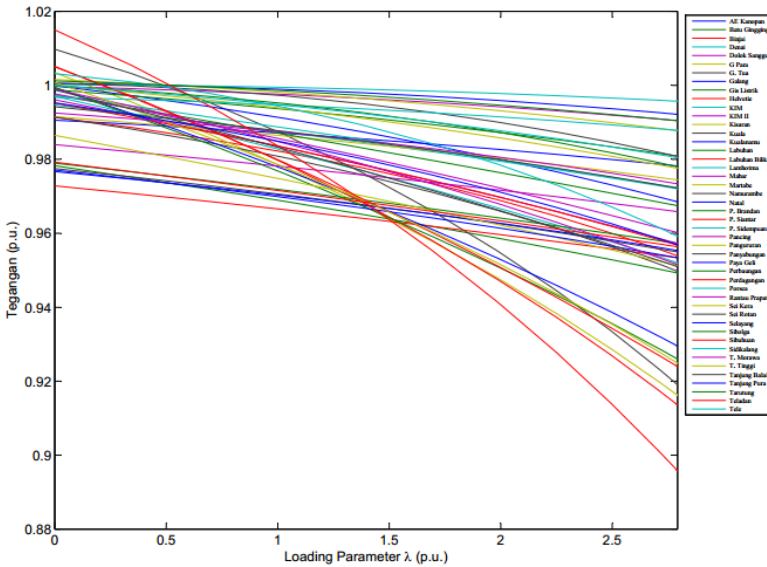
Selanjutnya dilakukan simulasi dan analisa penambahan beban secara kontinyu dengan menggunakan metode *Continuation Power Flow* (CPF). Analisa stabilitas tegangan ini diawali beban titik awal operasi stabil kemudian beban ditingkatkan sesuai parameter beban λ sampai titik kritis tercapai. Beban didefinisikan dengan persamaan :

$$P_{Di} = \lambda_{max} P_{Dio} \quad (4.1)$$

$$Q_{Di} = \lambda_{max} Q_{Dio} \quad (4.2)$$

Dimana P_{Dio} dan Q_{Dio} adalah daya aktif dan daya reaktif beban dasar pada bus i , sedangkan P_{Di} dan Q_{Di} merupakan daya aktif dan daya reaktif beban di bus i saat titik operasi maksimum pembebanan yang didefinisikan oleh $\lambda_{max} = (1+\lambda)$. Hasil simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) ini untuk mendapatkan bus terkritik.

Berikut hasil simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) sebelum pemasangan UPFC yang diperlihatkan pada gambar 4.1



Gambar 4.2 Hasil *Continuation Power Flow* (CPF) sebelum pemasangan UPFC

Dari hasil simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) pada gambar 4.2, didapat nilai λ atau faktor pengali pembebanan maksimum pada sistem sebelum pemasangan UPFC adalah sebesar 2.7932 p.u. apabila dikoversikan dalm bentuk tabel maka hasilnya seperti ditunjukan pada tabel 4.2. Pada tabel 4.2 menunjukan baris (kondisi awal) dimana profil tegangan dan beban (MW) awal operasi bus sebelum dilakukan penambahan beban, dan baris (kondisi akhir) menunjukan profil

tegangan, *voltage collapse* dan beban (MW) maksimum bus saat mencapai λ maksimum atau *Maximum Loading Parameter* (MLP).

Tabel 4.2 Hasil simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) sebelum pemasangan UPFC

No Bus	Kondisi Awal			Kondisi Akhir			
	Volt (p.u.)	λ (kali)	Beban (MW)	<i>Voltage Collapse</i> (p.u)	<i>Vcritical</i> (p.u)	λ (kali)	Beban Maks. (MW)
1	0.98714	1	26.08	0.9683	0.9782	2.7932	72.847
2	0.96895	1	193.2	0.9394	0.9493	2.7932	539.65
5	0.98226	1	83.41	0.9440	0.9539	2.7932	232.98
8	0.98282	1	91.77	0.9421	0.9520	2.7932	256.33
9	0.99763	1	2.93	0.9805	0.9905	2.7932	8.184
10	0.97863	1	18.41	0.9065	0.9162	2.7932	51.423
11	0.98752	1	12.63	0.9093	0.9190	2.7932	35.278
12	0.99139	1	14.12	0.9586	0.9685	2.7932	39.44
13	0.97192	1	132.49	0.9473	0.9573	2.7932	370.07
16	0.96662	1	136.88	0.9434	0.9534	2.7932	382.33
18	0.98758	1	202.02	0.9621	0.9720	2.7932	564.28
19	0.98361	1	105.41	0.9474	0.9573	2.7932	294.43
20	0.98651	1	56.53	0.9645	0.9744	2.7932	157.9
22	0.98088	1	31.51	0.9398	0.9497	2.7932	88.014
23	0.97798	1	88.86	0.9197	0.9295	2.7932	248.21
24	0.98711	1	56.42	0.9576	0.9675	2.7932	157.59
26	0.98360	1	19.89	0.9469	0.9568	2.7932	55.557
27	0.98879	1	60.15	0.9624	0.9723	2.7932	168.01
28	0.97818	1	66.93	0.9559	0.9659	2.7932	186.95
29	0.99818	1	6.46	0.9778	0.9878	2.7932	18.044
30	0.97066	1	83.71	0.9450	0.9550	2.7932	233.82
31	0.99900	1	6.5	0.9822	0.9922	2.7932	18.156
34	0.99371	1	56.07	0.9709	0.9809	2.7932	156.61
35	0.97980	1	95.31	0.9039	0.9136	2.7932	266.22
36	0.99950	1	61.97	0.9858	0.9957	2.7932	173.09
39	0.98568	1	145.8	0.9503	0.9602	2.7932	407.25
40	0.99395	1	8.44	0.9677	0.9776	2.7932	23.58
41	0.99735	1	13.17	0.9709	0.9808	2.7932	36.79
43	0.97038	1	194.52	0.9454	0.9553	2.7932	543.33

Tabel 4.2 Hasil simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) sebelum pemasangan UPFC (lanjutan)

No Bus	Kondisi Awal			Kondisi Akhir			
	Volt (p.u.)	λ (kali)	Beban (MW)	Voltage Collapse (p.u.)	Vcritical (p.u.)	λ (kali)	Beban Maks. (MW)
45	0.97687	1	45.66	0.9162	0.9260	2.7932	127.54
46	0.97990	1	132.23	0.9142	0.9240	2.7932	369.34
49	0.99446	1	13.94	0.9494	0.9592	2.7932	38.94
50	0.98751	1	97.82	0.9634	0.9734	2.7932	273.23
54	0.97484	1	108.51	0.9414	0.9513	2.7932	303.09
55	0.98775	1	110.15	0.9623	0.9722	2.7932	307.67
56	0.96991	1	127.68	0.9434	0.9534	2.7932	356.64
57	0.99865	1	40.03	0.9805	0.9905	2.7932	111.81
58	0.98370	1	19.47	0.8861	0.8957	2.7932	54.38
59	0.99477	1	17.63	0.9779	0.9878	2.7932	49.24
66	0.98484	1	92.62	0.9417	0.9515	2.7932	258.71
67	0.97861	1	79.04	0.9151	0.9248	2.7932	220.77
69	0.98329	1	79.69	0.9411	0.9510	2.7932	222.59
70	0.98494	1	52.64	0.9470	0.9569	2.7932	147.03
71	0.99528	1	46.36	0.9681	0.9780	2.7932	129.49
72	0.97158	1	193.57	0.9464	0.9564	2.7932	540.68
73	0.99485	1	1.02	0.9705	0.9805	2.7932	2.85

Lalu langkah selanjutnya, melakukan perhitungan besar penurunan tegangan untuk mengetahui urutan sensitivitas bus mulai dari yang tertinggi sampai terendah berdasarkan hasil simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) pada tabel 4.3. Pada tabel 4.3 dimana volt awal adalah tegangan operasi dan volt akhir adalah tegangan kritis yang menunjukan perhitungan besar penurunan tegangan pada 10 bus terkritis.

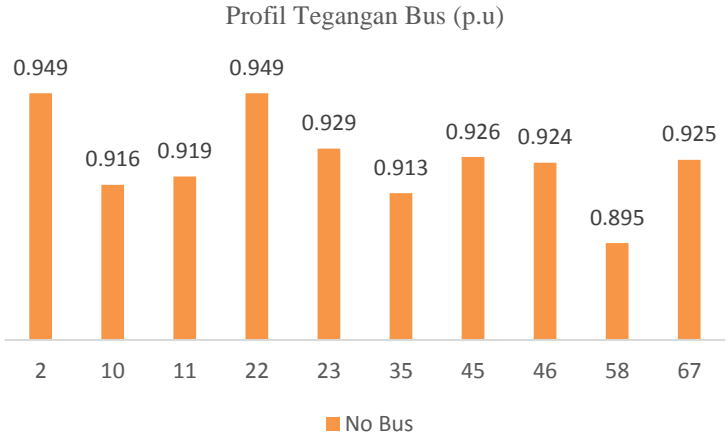
Tabel 4.3 Hasil perhitungan penurunan tegangan pada 10 bus terkritis hasil *Continuation Power Flow* (CPF)

No	No Bus	Nama Bus	Volt Awal (p.u)	Volt Akhir (p.u)	ΔV (p.u)
1	58	Sibuhuan	0.98370	0.89576	0.08794
2	11	G. Tua	0.98752	0.91905	0.06847

Tabel 4.3 Hasil perhitungan penurunan tegangan pada 10 bus terkritis hasil *Continuation Power Flow* (CPF) (lanjutan)

No	No Bus	Nama Bus	Volt Awal (p.u)	Volt Akhir (p.u)	ΔV (p.u)
3	35	P. Siantar	0.97980	0.91369	0.06611
4	10	G. Para	0.97863	0.91636	0.06227
5	46	Perdagangan	0.97990	0.92405	0.05585
6	67	T. Tinggi	0.97861	0.92504	0.05357
7	45	Perbaungan	0.97687	0.92639	0.05048
8	23	Kualanamu	0.97798	0.9299	0.04808
9	22	Kuala	0.98088	0.94997	0.03091
10	2	Batu Gingging	0.96895	0.94986	0.01909

Berdasarkan tabel 4.3, apabila diplot dalam bentuk grafik maka akan ditunjukkan seperti gambar 4.3. Pada gambar 4.3 merupakan hasil plot grafik profil tegangan setiap bus kritis yang ditunjukkan seperti di bawah ini.



Gambar 4.3 Grafik profil tegangan bus kritis sistem 150kV dan 275kV

Dari hasil perhitungan penurunan tegangan pada 10 bus kritis pada tabel 4.3 didapatkan bahwa bus 58, 11, 35, dan 10 telah diidentifikasi sebagai bus paling kritis kestabilan tegangannya dalam kondisi tanpa

adanya kontroler yang dihubungkan pada sistem dengan masing-masing besar penurunan tegangan sebesar 0.087 pu, 0.068 pu, 0.066 pu, dan 0.062 pu. Hal ini menjadi dasar pemilihan kandidat lokasi pemasangan UPFC.

Berdasarkan kurva PV pada gambar 4.2, bus Sibuhuan (58) memiliki kemiringan kurva yang paling curam sehingga paling kritis. Sedangkan berdasarkan magnitudo tegangan seperti pada gambar 4.3, bus 58 memiliki nilai magnitud tegangan terkecil sebesar 0.895 p.u dengan penurunan tegangan sebesar 0.0879 p.u pada saat parameter pembebanan maksimum (MLP). Dari kondisi tersebut maka urutan lokasi pemasangan *Unified Power Flow Controller* (UPFC) pada saluran 58-11 dan saluran 35-10.

4.3 Pemasangan UPFC

Banyaknya bus kritis lebih dari satu saluran transmisi yang terhubung pada sistem maka pemilihan lokasi terbaik pemasangan UPFC dilakukan pada saluran bus yang menghasilkan rugi-rugi daya paling rendah di sistem.

Disamping itu, konverter shunt UPFC di set untuk mengatur magnitudo tegangan pada 1 pu. Impedansi sumber pada konverter seri dan konverter *shunt* di set sebesar 0.1 pu. Pemilihan nilai parameter UPFC yang dihubungkan pada sistem dipasang pada masing-masing saluran ditunjukkan pada tabel 4.4

Tabel 4.4 Parameter untuk UPFC

S	V	f	Kr	Tr	Cp	Vp max	Vp min	Vq max	Vq min	Iq max	Iq min
MVA	kV	Hz	pu/pu	s	%	pu	pu	pu	pu	pu	pu
100	150	50	50	0.1	60	0.2	0	0.2	0.001	1.1	-0.8

dimana :

- S : Rating daya
- V : Rating tegangan
- f : Rating frekuensi
- Cp : Persentase kompensasi seri
- Kr : *Regulator gain*
- Tr : *Regulator time constant*
- Vp max : Maksimum tegangan phasa Vs
- Vp min : Minimum tegangan phasa Vs
- Vq max : Maksimum tegangan kuadratur Vs

$V_q \text{ min}$: Minimum tegangan kuadratur V_s
 $I_q \text{ max}$: Maksimum arus I_{sh}
 $I_q \text{ min}$: Minimum arus I_{sh}

4.3.1 Nilai Optimal Setting Parameter UPFC

Simulasi aliran daya dengan pemasangan UPFC di saluran 58-11 dan saluran 35-10 didapatkan konvergen pada iterasi ke 13. Optimal parameter UPFC didapatkan melalui metode aliran daya *Newton-Raphson* dengan toleransi aliran daya sebesar $1e-12$. Nilai optimal parameter yang dihasilkan oleh UPFC yang dihubungkan pada sistem ditunjukkan pada tabel 4.5

Tabel 4.5 Nilai Optimal Parameter UPFC

No	Lokasi UPFC	V_p (pu)	V_q (pu)	γ (deg)	I_q (pu)	θ (deg)
1	58-11	0	0.00565	90	0.2250	-0.278
2	35-10	0	0.01070	90	0.7402	-3.901

4.3.2 Perbandingan Pemasangan UPFC di Saluran 58-11 dan Saluran 35-10

Adanya pemasangan UPFC pada sistem menyebabkan peningkatan transfer daya pada saluran transmisi, sehingga berpengaruh pada penurunan daya pembangkitan dan *losses* pada sistem. Total *losses* sistem kelistrikan Sumatera Utara di saluran 58-11 dan 35-10 yang ditunjukkan pada tabel 4.6

Tabel 4.6 Hasil Pemasangan UPFC di saluran 58-11 dan saluran 35-10

No	Lokasi UPFC		Tegangan (pu)		Total <i>Losses</i> (pu)	
	dari bus	ke bus	Bus 58	Bus 11	Daya Nyata	Daya Reaktif
1	Tanpa UPFC		0.9837	0.9875	0.5789	-5.6595
2	58	11	1	0.9970	0.5767	-5.5030
3	35	10	1	0.9991	0.5419	-5.8746

Berdasarkan hasil simulasi aliran daya dengan pemasangan UPFC pada sistem pada tabel 4.6, total rugi-rugi daya di sistem juga mengalami penurunan, yaitu pada saluran 58-11 rugi-rugi daya turun dari 0.5789 pu menjadi 0.5767 pu atau sebesar 220kW dan pada saluran 35-10 rugi-rugi daya turun dari 0.5789 pu menjadi 0.5419 pu atau sebesar 3,7MW.

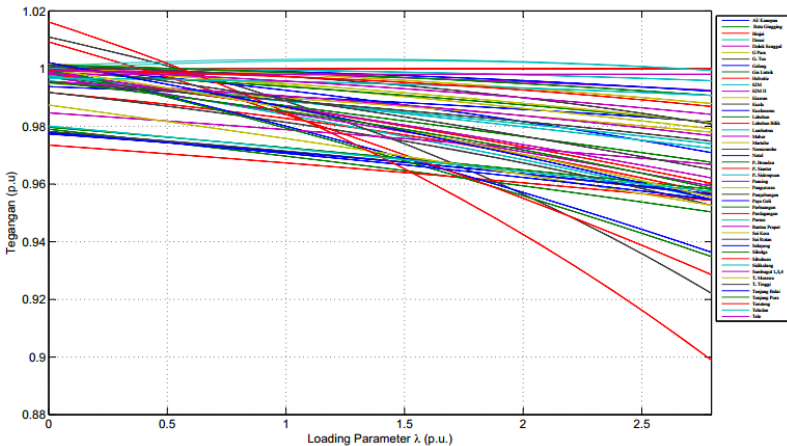
Berdasarkan peningkatan magnitude tegangan dan penurunan *losses* pada masing-masing saluran, lokasi pemasangan terbaik UPFC pada sistem di saluran 35-10.

4.4 Analisis Stabilitas Tegangan Setelah Pemasangan UPFC

Tujuan dasar pemasangan UPFC adalah untuk meningkatkan stabilitas tegangan pada sistem. Hasil simulasi aliran daya yang diperoleh dengan pemasangan UPFC terhadap kestabilan tegangan dapat diketahui dari peningkatan profil tegangan bus di sistem, penurunan besar pembangkitan dan *losses* pada sistem.

Pemasangan dilakukan dengan menambahkan 1 unit UPFC pada saluran 35-10, yaitu bus 35 dihubungkan paralel dengan konverter *shunt* melalui transformator *shunt* dan bus 11 dihubungkan seri dengan konverter seri melalui transformator seri. Besar kapasitas rating yang digunakan untuk konverter seri dan konverter *shunt* dipilih 100MVA.

Berikut hasil simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) setelah pemasangan UPFC yang diperlihatkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Hasil *Continuation Power Flow* (CPF) setelah pemasangan UPFC

Dari hasil simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) pada gambar 4.4, apabila dikoversikan dalam bentuk tabel maka hasilnya seperti

ditunjukkan pada tabel 4.7, yang menunjukkan hasil peningkatan tegangan kritis dan pembebanan daya maksimum yang dapat dioperasikan oleh bus.

Tabel 4.7 Hasil simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) setelah pemasangan UPFC

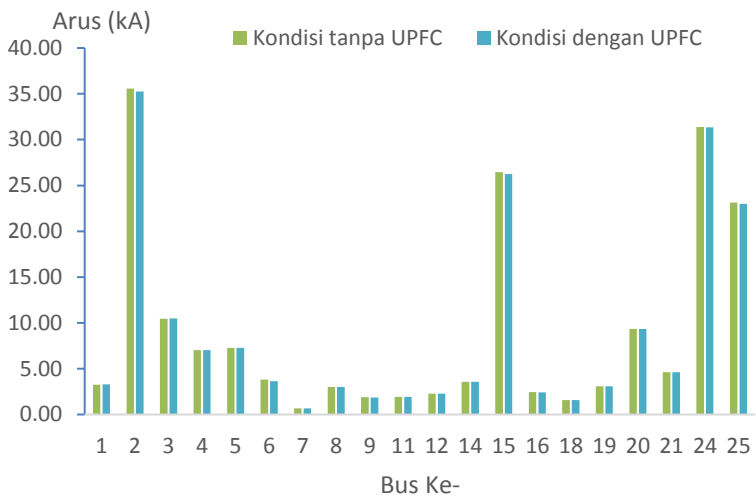
No Bus	Kondisi Awal			Kondisi Akhir			
	Volt (p.u.)	λ (kali)	Beban (MW)	Voltage Collapse (p.u)	Vcritical (p.u)	λ (kali)	Beban Maks. (MW)
1	0.98714	1	26.08	0.97162	0.9816	2.7936	72.86
2	0.96895	1	193.2	0.94038	0.9503	2.7936	539.72
5	0.98226	1	83.41	0.94684	0.9568	2.7936	233.01
8	0.98282	1	91.77	0.94468	0.9546	2.7936	256.37
9	0.99763	1	2.93	0.98254	0.9925	2.7936	8.19
10	0.97863	1	18.41	0.96921	0.9792	2.7936	51.43
11	0.98752	1	12.63	0.91237	0.9221	2.7936	35.28
12	0.99139	1	14.12	0.96096	0.9709	2.7936	39.45
13	0.97192	1	132.49	0.94821	0.9582	2.7936	370.12
16	0.96662	1	136.88	0.94439	0.9544	2.7936	382.39
18	0.98758	1	202.02	0.96399	0.9739	2.7936	564.36
19	0.98361	1	105.41	0.94937	0.9593	2.7936	294.47
20	0.98651	1	56.53	0.96801	0.9780	2.7936	157.92
22	0.98088	1	31.51	0.94271	0.9526	2.7936	88.03
23	0.97798	1	88.86	0.92647	0.9363	2.7936	248.24
24	0.98711	1	56.42	0.95762	0.9676	2.7936	157.61
26	0.98360	1	19.89	0.95035	0.9603	2.7936	55.56
27	0.98879	1	60.15	0.96247	0.9724	2.7936	168.04
28	0.97818	1	66.93	0.95682	0.9668	2.7936	186.98
29	0.99818	1	6.46	0.97796	0.9879	2.7936	18.05
30	0.97066	1	83.71	0.94626	0.9562	2.7936	233.85
31	0.99900	1	6.5	0.9822	0.9922	2.7936	18.16
34	0.99371	1	56.07	0.97136	0.9813	2.7936	156.64
35	0.97980	1	95.31	0.99	1.0000	2.7936	266.26
36	0.99950	1	61.97	0.98586	0.9958	2.7936	173.12
39	0.98568	1	145.8	0.95222	0.9621	2.7936	407.31

Tabel 4.7 Hasil simulasi *Continuation Power Flow* (CPF) setelah pemasangan UPFC (lanjutan)

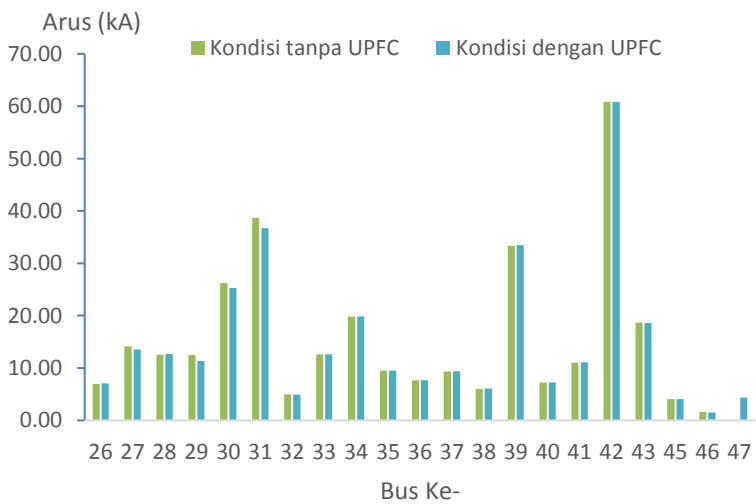
No Bus	Kondisi Awal			Kondisi Akhir			
	Volt (p.u.)	λ (kali)	Beban (MW)	Voltage Collapse (p.u)	Vcritical (p.u)	λ (kali)	Beban Maks. (MW)
40	0.99395	1	8.44	0.97134	0.9813	2.7936	23.58
41	0.99735	1	13.17	0.97086	0.9808	2.7936	36.79
43	0.97038	1	194.52	0.94661	0.9566	2.7936	543.41
45	0.97687	1	45.66	0.92498	0.9348	2.7936	127.56
46	0.97990	1	132.23	0.91874	0.9286	2.7936	369.40
49	0.99446	1	13.94	0.98944	0.9994	2.7936	38.94
50	0.98751	1	97.82	0.96682	0.9768	2.7936	273.27
54	0.97484	1	108.51	0.9427	0.9526	2.7936	303.13
55	0.98775	1	110.15	0.96495	0.9749	2.7936	307.72
56	0.96991	1	127.68	0.94467	0.9546	2.7936	356.69
57	0.99865	1	40.03	0.98076	0.9907	2.7936	111.83
58	0.98370	1	19.47	0.88926	0.8990	2.7936	54.39
59	0.99477	1	17.63	0.98075	0.9907	2.7936	49.25
66	0.98484	1	92.62	0.94556	0.9555	2.7936	258.74
67	0.97861	1	79.04	0.95513	0.9651	2.7936	220.81
69	0.98329	1	79.69	0.94476	0.9547	2.7936	222.62
70	0.98494	1	52.64	0.94856	0.9585	2.7936	147.06
71	0.99528	1	46.36	0.97691	0.9869	2.7936	129.51
72	0.97158	1	193.57	0.94745	0.9574	2.7936	540.76
73	0.99485	1	1.02	0.97419	0.9841	2.7936	2.85

Berdasarkan tabel 4.7, setelah pemasangan UPFC didapat bahwa nilai λ atau faktor pengali pembebanan maksimum pada sistem mengalami peningkatan adalah sebesar 2.7936 p.u. Adanya pemasangan UPFC pada sistem juga difungsikan untuk mengatur aliran daya saluran sehingga berpengaruh terhadap perubahan besar arus dan daya yang mengalir pada saluran saat kondisi sebelum dan setelah pemasangan UPFC.

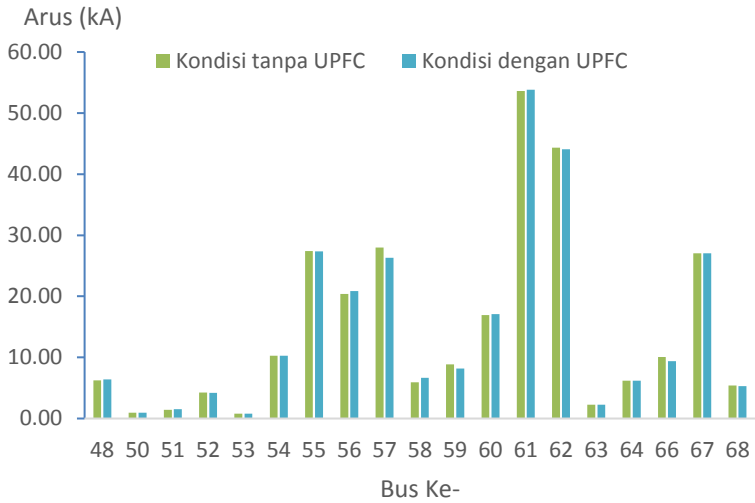
Berikut gambar 4.5 yang menunjukkan perubahan besar arus yang mengalir pada saluran sistem saat sebelum dan sesudah pemasangan UPFC.



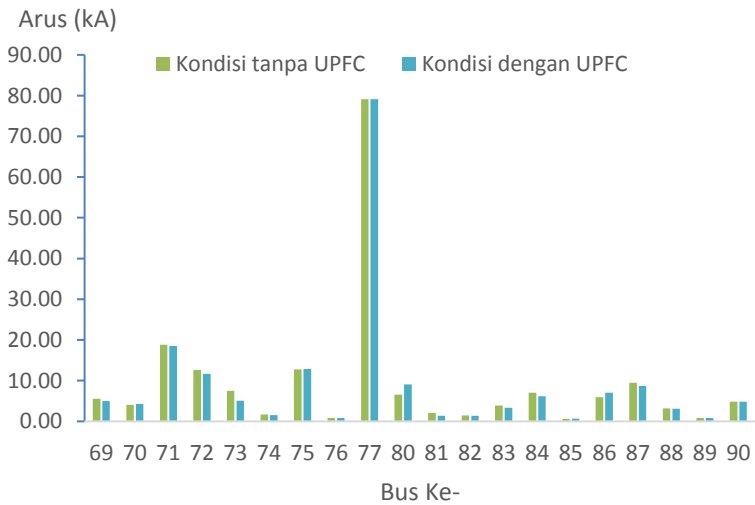
(a)



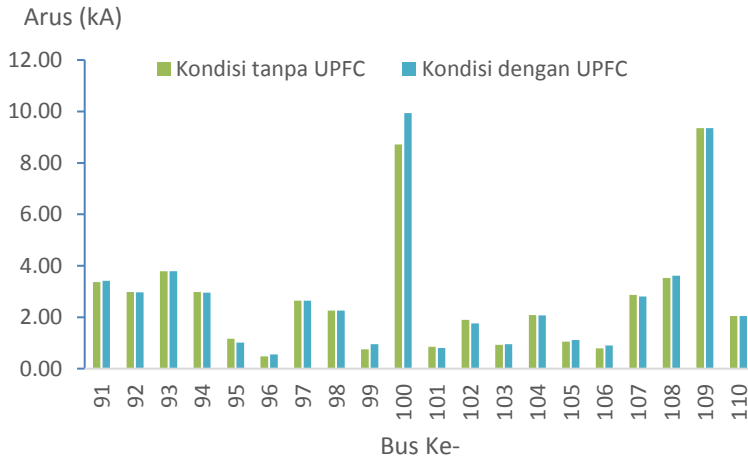
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.5 Grafik perubahan arus yang mengalir pada saluran (a)1-25, (b)26-47, (c)48-68, (d)69-90, dan (e)91-110 saat kondisi sebelum dan sesudah pemasangan UPFC

4.4.1 Profil Tegangan Bus Sistem 150kV dan 275kV

Peningkatan magnitud tegangan pada bus setelah pemasangan UPFC di sistem ditunjukkan pada tabel 4.8

Tabel 4.8 Peningkatan profil tegangan bus sistem 150kV dan 275kV setelah pemasangan UPFC di saluran 35-10

No Bus	Nama Bus	Volt Awal (p.u)	θ (deg)	Volt UPFC (p.u)	θ (deg)
1	AEK Kanopan	0.98714	-7.71	0.99137	-5.35
2	Batu Gingging	0.96895	-6.33	0.96994	-5.45
3	Belawan PLTU	0.99718	-2.97	0.99729	-2.08
4	Belawan PTLGU	1	0.00	1	0.00
5	Binjai	0.98226	-3.41	0.98301	-2.76
6	Brastagi	0.99095	-4.53	0.99136	-3.07
7	Dairi	1	-3.99	1	-2.52

Tabel 4.8 Peningkatan profil tegangan bus sistem 150kV dan 275kV setelah pemasangan UPFC di saluran 35-10 (lanjutan)

No Bus	Nama Bus	Volt Awal (p.u)	θ (deg)	Volt UPFC (p.u)	θ (deg)
8	Denai	0.98282	-6.60	0.98449	-5.67
9	Dolok Sanggul	0.99763	-3.34	0.99806	-1.53
10	G. Para	0.97863	-7.26	0.99917	-4.31
11	G. Tua	0.98752	-2.66	0.98929	-0.44
12	Galang	0.99139	-5.46	0.99294	-4.48
13	GIS Listrik	0.97192	-6.22	0.97292	-5.32
14	Glugur	0.96904	-6.11	0.96999	-5.27
15	Hasang 1	0.98768	-7.70	0.99191	-5.33
16	Helvetie	0.96662	-6.24	0.96757	-5.40
17	K. Tanjung	0.98920	-8.08	0.99797	-5.65
18	KIM	0.98758	-5.91	0.98914	-5.00
19	KIM II	0.98361	-6.36	0.98519	-5.45
20	Kisaran	0.98651	-7.85	0.99094	-5.49
21	Kota Pinang	1	-6.90	1	-4.47
22	Kuala	0.98088	-3.50	0.98163	-2.85
23	Kualanamu	0.97798	-6.69	0.98084	-5.58
24	Labuhan	0.98711	-3.61	0.98723	-2.72
25	Labuhan Angin	1.01	5.96	1.01	8.02
26	Labuhan Bilik	0.98360	-8.03	0.98767	-5.67
27	Lamhotma	0.98879	-3.48	0.98890	-2.59
28	Mabar	0.97818	-5.78	0.97914	-4.89
29	Martabe	0.99818	2.06	0.99823	4.15
30	Namurambe	0.97066	-6.12	0.97170	-5.25
31	Natal	0.99900	11.08	0.99900	13.23
32	Negeri Dolok	0.99630	-5.29	0.99784	-4.31
33	New P. Sidempuan	1	2.19	1	4.33
34	P. Brandan	0.99371	-0.89	0.99383	-0.21
35	P. Siantar	0.97980	-6.72	1	-3.90
36	P. Sidempuan	0.99950	2.14	0.99955	4.28
37	P. Susu	1	-0.20	1	0.50
38	Pakat	1	-3.28	1	-1.47
39	Pancing	0.98568	-6.46	0.98724	-5.54

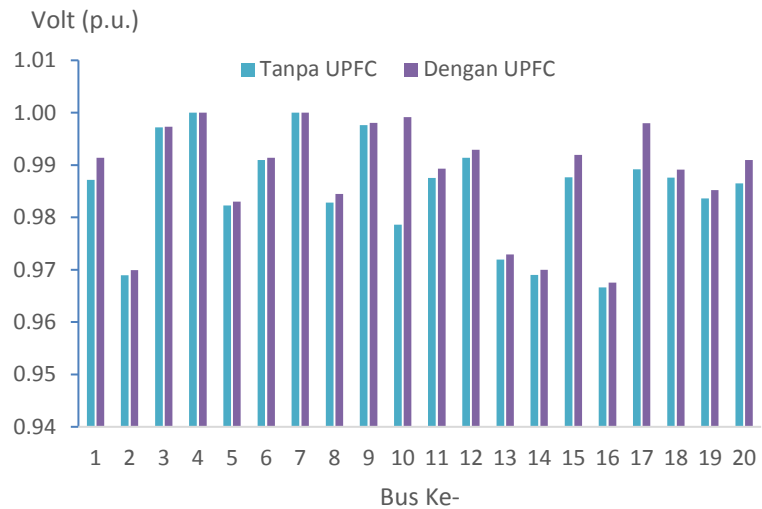
Tabel 4.8 Peningkatan profil tegangan bus sistem 150kV dan 275kV setelah pemasangan UPFC di saluran 35-10 (lanjutan)

No Bus	Nama Bus	Volt Awal (p.u)	θ (deg)	Volt UPFC (p.u)	θ (deg)
40	Pangurusan	0.99395	-3.73	0.99488	-1.98
36	P. Sidempuan	0.99950	2.14	0.99955	4.28
41	Panyabungan	0.99735	9.89	0.99735	12.04
42	Parlilitan	1	-2.82	1	-1.00
43	Paya Geli	0.97038	-5.94	0.97133	-5.09
44	Paya Pasir	0.98757	-4.81	0.98821	-3.92
45	Perbaungan	0.97687	-6.82	0.98035	-5.63
46	Perdagangan	0.97990	-9.53	0.98553	-7.13
47	PLTA Asahan 3	1	22.85	1	24.74
48	PLTP S Merapi	1	11.59	1	13.73
49	Porsea	0.99446	-3.69	1.00331	-1.43
50	Rantau Prapat	0.98751	-7.58	0.99154	-5.22
51	Renun 1,2	1	-3.45	1	-1.86
52	Salak	1	-3.55	1	-1.89
53	Sarulla	1	3.19	1	5.23
54	Sei Kera	0.97484	-6.81	0.97613	-5.88
55	Sei Rotan	0.98775	-5.78	0.98942	-4.87
56	Selayang	0.96991	-6.07	0.97091	-5.21
57	Sibolga	0.99865	2.22	0.99872	4.29
58	Sibuhuan	0.98370	-3.30	0.98549	-1.08
59	Sidikalang	0.99477	-3.87	0.99565	-2.23
60	Sigundong	1	-2.83	1	-0.94
61	Simangkok	1	1.20	1	3.08
62	Sipan 1	1	2.31	1	4.38
63	Sipan 2	1	2.31	1	4.38
64	Sumbagut 1,3,4	0.99688	-5.33	0.99848	-4.42
65	Sumut	1	-2.61	1	-1.72
66	T. Morawa	0.98484	-6.16	0.98684	-5.16
67	T. Tinggi	0.97861	-7.64	0.99312	-5.16
68	Tanah Jawa	1	-7.06	1	-4.20
69	Tanjung Balai	0.98329	-8.55	0.98780	-6.18
70	Tanjung Pura	0.98494	-2.33	0.98537	-1.66

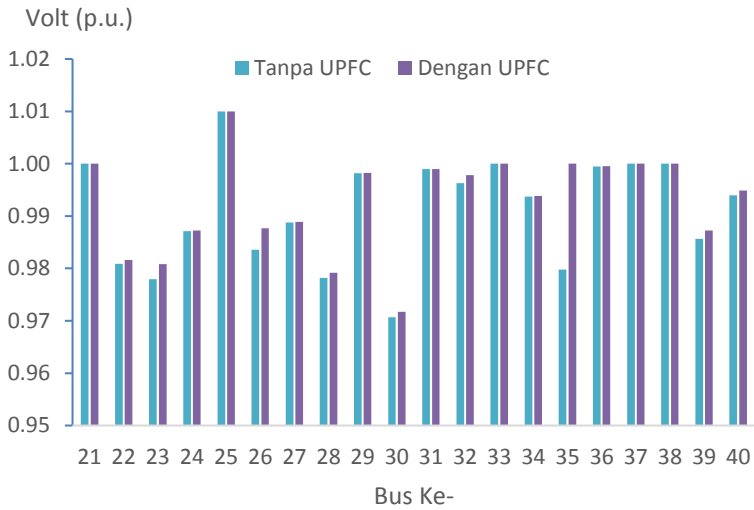
Tabel 4.8 Peningkatan profil tegangan bus sistem 150kV dan 275kV setelah pemasangan UPFC di saluran 35-10 (lanjutan)

No Bus	Nama Bus	Volt Awal (p.u)	θ (deg)	Volt UPFC (p.u)	θ (deg)
71	Tarutung	0.99528	-3.23	0.99740	-1.37
72	Teladan	0.97158	-6.71	0.97277	-5.78
73	Tele	0.99485	-3.68	0.99578	-1.94
74	Titi Kuning	0.97318	-6.33	0.97428	-5.41
75	Wampu	1	-4.28	1	-2.82

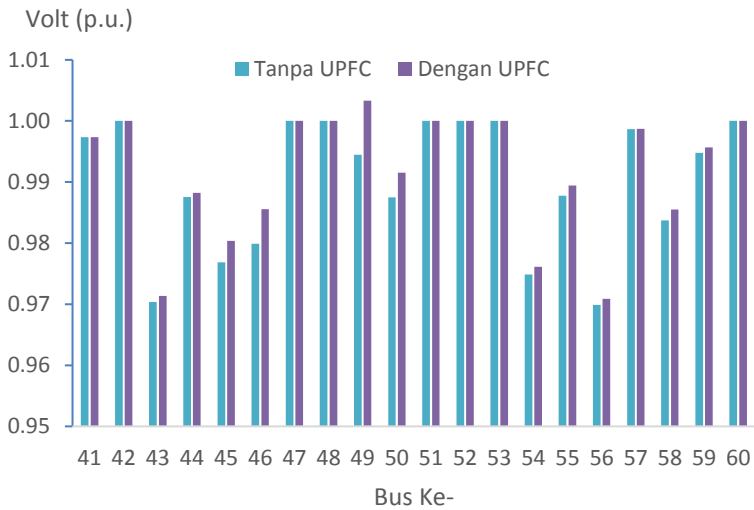
Peningkatan profil tegangan setiap bus setelah pemasangan UPFC dari tabel 4.8, apabila di plot dalam bentuk grafik maka akan terlihat seperti gambar 4.6.



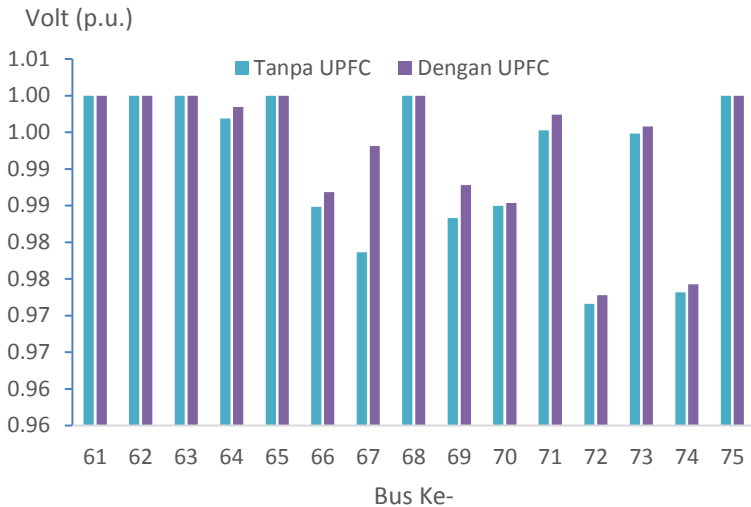
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.6 Grafik profil tegangan bus sistem sebelum dan setelah pemasangan UPFC bus nomor (a) 1-20, (b)21-40, (c) 41-60, dan (d)61-75

Berdasarkan grafik profil tegangan bus setelah pemasangan UPFC pada gambar 4.6 didapatkan bahwa bus yang digunakan sebagai lokasi pemasangan UPFC mengalami peningkatan magnitude tegangan yang signifikan, yaitu bus 35 meningkat 0.0202 pu (2,06%), dan bus 10 meningkat sebesar 0.0205 pu (2,09%). Secara keseluruhan persentase peningkatan profil tegangan bus berkisar 0,01-2,09% dengan magnitud tegangan sebesar 0,96 pu sampai 1,01 pu.

4.4.2 Besar Pembangkitan dan Rugi-rugi Daya Sistem Tegangan 150kV dan 275kV

Selain peningkatan profil tegangan, pemasangan UPFC juga berpengaruh pada total pembangkitan dan rugi-rugi daya di sistem. Pada tabel 4.9 di bawah ini memperlihatkan perbandingan besar rugi-rugi daya pada saluran transmisi 150 kV dan 275 kV dari hasil simulasi aliran daya sebelum dan sesudah pemasangan UPFC.

Tabel 4.9 Perbandingan besar pembangkitan dan *losses* sebelum dan sesudah pemasangan UPFC

No	Hasil <i>Power Flow</i>	Kondisi Awal	UPFC di Saluran 35-10
	Total Pembangkitan		
1	Daya aktif (MW)	3894.59	3890.90
2	Daya reaktif (MVAR)	1097.26	1074.55
	Total beban		
1	Daya aktif (MW)	3836.7	3836.7
2	Daya reaktif (MVAR)	1858.18	1858.18
	Total Rugi-rugi		
1	Daya aktif (MW)	57.89	54.20
2	Daya reaktif (MVAR)	-565.95	-587.46

Berdasarkan tabel 4.9 didapatkan bahwa rugi-rugi daya aktif pada saluran dapat tereduksi sebesar 6,39% (3,7MW) dari rugi-rugi daya yang semula bernilai 57,89 MW berkurang menjadi 54,19 MW. Dengan asumsi total beban tetap, Berkurangnya total *losses* akan mengakibatkan total pembangkitan yang perlu dibangkitkan akan semakin kecil, sehingga besar biaya pembangkitannya menjadi lebih murah. Selanjutnya berdampak pada penghematan biaya bahan bakar pembangkitan.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemilihan lokasi pemasangan UPFC dari jumlah bus kritis yang lebih dari satu dapat dilakukan dengan memilih bus yang menghasilkan penurunan *losses* paling besar.
2. Pemasangan UPFC di saluran 35-10 dapat meningkatkan profil tegangan bus sistem dengan persentase 0,01-2,09%.
3. Profil tegangan bus yang dipasang UPFC mengalami peningkatan yang signifikan yaitu bus 35 meningkat 0.0202 pu (2,06%), dan bus 10 meningkat sebesar 0.0205 pu (2,09%).
4. Adanya pemasangan UPFC di sistem selain peningkatan profil tegangan bus juga dapat menurunkan *losses* daya dengan persentase daya aktif sebesar 6,39% atau 3,7MW, dengan total beban yang tetap maka besar pembangkitan menjadi turun.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan simulasi ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu sebuah pengembangan dalam penentuan kapasitas UPFC dengan menggunakan AI untuk mendapatkan hasil yang optimal.
2. Dalam pemilihan bus kritis lebih baik dengan menggabungkan metode CPF dengan *stability line index* untuk mendapatkan lokasi yang lebih akurat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) tahun 2016 s.d 2025.” 10-Jun-2016.
- [2] Mehrdad Ahmadi Kamarposhti, Mostafa Alinezhad, Hamid Lesani, and Nemat Talebi, “Comparison of SVC, STATCOM, TCSC, and UPFC Controllers for Static Voltage Stability Evaluated by Continuation Power Flow Method,” *IEEE Electr. Power Energy Conf.*, Oct. 2008.
- [3] Zainal Abidin, Sasongko Pramono Hadi, and Sarjiya, “Dampak Pemasangan Peralatan FACTS Terhadap Stabilitas Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik,” *Univ. Gadjah Mada*, vol. 16, no. 3, pp. 149–152, 2014.
- [4] William D. Stevenson and John J. Grainger, *Power System Analysis*, International. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [5] Tutuk Agung Sembogo, “Studi Perbaikan Stabilitas Tegangan Kurva P-V pada Sistem Jawa-Bali 500kV dengan Pemasangan Kapasitor Bank Menggunakan Teori Sensitivitas,” *Proceeding Semin. Tugas Akhir Jur. Tek. Elektro FTI-ITS*, pp. 1–7.
- [6] Ontoseno Penangsang, “Materi Analisa Sistem Tenaga I.” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 21-Jun-2009.
- [7] Hadi Saadat, *Power system Analysis*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 1999.
- [8] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [9] Lesnanto Multa Putranto, Sasongko Pramono Hadi, and Restu Prima Aridani, “Pengaruh Penempatan Unified Power Flow Controller Terhadap Kestabilan Tegangan Sistem Tenaga Listrik,” *Pros. Conf. Smart-Green Technol. Electr. Inf. Syst.*, vol. A-008, 2013.
- [10] Andi M. Nur Putra and Arfita Yuana Dewi, “Studi Analisa Kestabilan Tegangan Sistem 150 kV Berdasarkan Perubahan Tegangan (Aplikasi PT. PLN Batam),” *J. Tek. Elektro ITP*, vol. 2, pp. 18–25, Jan. 2013.

- [11] Hasan Hedayati, S. A. Nabaviniaki, and Adel Akbarimajd, "A Method for Placement of DG Units in Distribution Networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 3, pp. 1620–1629, Jul. 2008.
- [12] Mohamed M. Aly and Mamdouh Abdel Akher, "A Continuation Power-Flow for Distribution Systems Voltage Stability Analysis," *IEEE Int. Conf. Power Energy*, pp. 470–475, Dec. 2012.
- [13] P. R. S. Anju Gupta, "Optimal Placement of FACTS Devices for Voltage Stability Using Line Indicators," *IEEE Electr. Power Energy Conf.*, 2012.
- [14] A. Mete Vural and Mehmet Tumay, "Mathematical Modeling and Analysis of A Unified Power Flow Controller: A Comparison of Two Approaches in Power Flow Studies and Effects of UPFC Location," *Elsevier Electr. Power Energy Syst.*, vol. 29, pp. 617–629, 2007.
- [15] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS-Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [16] V. Srinivasa Rao and R. Srinivasa Rao, "Optimal Parameter Setting of FACTS Devices," *Int. J. Emerg. Trends Electr. Electron. IJETEE*, vol. 11, no. 6, Oct. 2015.

LAMPIRAN

A. Tabel hasil simulasi *power flow* sistem menggunakan PowerWorld 9

No Bus	Tipe Bus	V (pu)	θ (deg)	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
1	PQ	0.9869	-7.71	26.08	12.63	0	0
2	PQ	0.9689	-6.33	193.2	93.57	0	0
3	PV	0.9972	-2.97	0	0	170.67	149.88
4	Slack	1.0000	0	0	0	612.01	45.03
5	PQ	0.9822	-3.41	83.41	40.4	0	0
6	PV	0.9909	-4.53	55.31	26.79	8.85	7.45
7	PV	1.0000	-3.99	8.58	4.16	20.92	5.33
8	PQ	0.9827	-6.6	91.77	44.45	0	0
9	PQ	0.9976	-3.34	2.93	1.42	0	0
10	PQ	0.9783	-7.25	18.41	8.92	0	0
11	PQ	0.9874	-2.66	12.63	6.12	0	0
12	PQ	0.9912	-5.46	14.12	6.84	0	0
13	PQ	0.9719	-6.22	132.49	64.17	0	0
14	PV	0.9690	-6.11	91.66	44.39	31.63	30.87
15	PV	0.9874	-7.69	0	0	32.72	30.81
16	PQ	0.9666	-6.24	136.88	66.29	0	0
17	PV	0.9889	-8.07	48.18	23.33	60.41	59.25
18	PQ	0.9875	-5.9	202.02	97.84	0	0
19	PQ	0.9835	-6.36	105.41	51.05	0	0
20	PQ	0.9862	-7.85	56.53	27.38	0	0
21	PV	1.0000	-6.9	51.21	24.8	93.42	44.19
22	PQ	0.9808	-3.5	31.51	15.26	0	0
23	PQ	0.9778	-6.69	88.86	43.04	0	0
24	PQ	0.9871	-3.61	56.42	27.33	0	0
25	PV	1.0100	5.96	4.2	2.03	129.86	15.69

No Bus	Type Bus	V (pu)	θ (deg)	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
26	PQ	0.9833	-8.03	19.89	9.63	0	0
27	PQ	0.9888	-3.48	60.15	29.13	0	0
28	PQ	0.9782	-5.78	66.93	32.42	0	0
29	PQ	0.9982	2.06	6.46	3.13	0	0
30	PQ	0.9706	-6.12	83.71	40.54	0	0
31	PQ	0.9990	11.08	6.5	3.15	0	0
32	PV	0.9961	-5.28	4.16	2.01	24.8	24.37
33	PV	1.0000	2.19	0	0	77.42	28.31
34	PQ	0.9937	-0.89	56.07	27.16	0	0
35	PQ	0.9794	-6.72	95.31	46.16	0	0
36	PQ	0.9995	2.14	61.97	30.01	0	0
37	PV	1.0000	-0.2	0	0	639.7	72.44
38	PV	1.0000	-3.28	4.47	2.16	6.46	5.08
39	PQ	0.9856	-6.46	145.8	70.61	0	0
40	PQ	0.9939	-3.74	8.44	4.09	0	0
41	PQ	0.9974	9.89	13.17	6.38	0	0
42	PV	1.0000	-2.82	0.44	0.21	20.56	1.39
43	PQ	0.9703	-5.94	194.52	94.21	0	0
44	PV	0.9875	-4.81	72.98	35.35	23.88	20.35
45	PQ	0.9767	-6.82	45.66	22.11	0	0
46	PQ	0.9797	-9.53	132.23	64.04	0	0
47	PV	1.0000	22.87	0	0	123.93	18.8
48	PV	1.0000	11.59	0	0	189.93	2.02
49	PQ	0.9938	-3.69	13.94	6.75	0	0
50	PQ	0.9872	-7.58	97.82	47.38	0	0
51	PV	1.0000	-3.45	0	0	38.26	6.24
52	PV	1.0000	-3.55	2.09	1.01	25.42	10.16
53	PV	1.0000	3.2	0	0	239.87	2.72
54	PQ	0.9748	-6.81	108.51	52.55	0	0
55	PQ	0.9877	-5.78	110.15	53.35	0	0

No Bus	Tipe Bus	V (pu)	θ (deg)	Load		Generator	
				MW	MVAR	MW	MVAR
56	PQ	0.9699	-6.07	127.68	61.84	0	0
57	PQ	0.9986	2.22	40.03	19.39	0	0
58	PQ	0.9836	-3.3	19.47	9.43	0	0
59	PQ	0.9947	-3.87	17.63	8.54	0	0
60	PV	1.0000	-2.83	0	0	28	9.18
61	PV	1.0000	1.21	0	0	87.33	48.65
62	PV	1.0000	2.32	0	0	13.2	1.6
63	PV	1.0000	2.31	0	0	12.86	1.78
64	PV	0.9968	-5.33	0	0	607.03	423.18
65	PV	1.0000	-2.61	0	0	499.86	61.82
66	PQ	0.9847	-6.16	92.62	44.86	0	0
67	PQ	0.9783	-7.64	79.04	38.28	0	0
68	PV	1.0000	-7.06	32.94	15.95	26.92	25.19
69	PQ	0.9830	-8.55	79.69	38.6	0	0
70	PQ	0.9849	-2.33	52.64	25.49	0	0
71	PQ	0.9951	-3.23	46.36	22.45	0	0
72	PQ	0.9715	-6.7	193.57	93.75	0	0
73	PQ	0.9948	-3.69	1.02	0.49	0	0
74	PV	0.9731	-6.33	130.83	63.36	20.94	15.4
75	PV	1	-4.29	0	0	27.67	26.77

B. Tabel aliran arus pada setiap saluran sebelum pemasangan UPFC

Line	From Bus	To Bus	Kondisi tanpa UPFC		
			I Flow	P Flow	Q Flow
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
1	Sei Kera	Denai	3.2432	-0.2966	-0.0351
2	Rantau Prapat	AE Kanopan	35.5578	1.7023	-0.2444
3	Sei Kera	Pancing	10.4504	-0.5594	-1.4815

Line	From Bus	To Bus	Kondisi tanpa UPFC		
			I Flow	P Flow	Q Flow
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
4	Labuhan	Lamhotma	7.0264	-0.3529	-0.1010
5	Kisaran	Tanjung Balai	7.2862	0.8007	-0.1037
6	Rantau Prapat	Kota Pinang	3.8061	-0.4196	-0.2916
7	Rantau Prapat	Kisaran	0.6542	0.0349	-0.0464
8	P. Sidempuan	G. Tua	3.0197	0.8580	-0.1797
9	G. Tua	Rantau Prapat	1.8762	0.5095	-0.1991
11	Sibuhuan	G. Tua	1.9190	-0.1947	-0.0951
12	Labuhan Bilik	Rantau Prapat	2.2808	-0.1989	-0.0971
14	Paya Pasir	Sei Rotan	3.5779	0.1485	-0.4718
15	N. P. Sidempuan	P. Sidempuan	26.4525	0.8023	0.2844
16	Rantau Prapat	P. Sidempuan	2.4351	-0.9606	0.2267
18	Natal	Panyabungan	1.5664	0.2255	-0.0173
19	PLTP S Merapi	Natal	3.0884	0.2906	0.0119
20	PLTP S Merapi	Panyabungan	9.3385	1.6087	0.0084
21	P. Sidempuan	Panyabungan	4.6314	-1.6750	0.2927
24	Paya Pasir	Belawan PLTU	31.3703	-5.5196	-1.4210
25	Mabar	Paya Pasir	23.1247	-3.0654	-0.7723
26	Mabar	KIM	6.9329	-0.0264	-0.6736
27	Paya Geli	Batu Gingging	14.1521	1.1423	0.0111
28	Paya Geli	Paya Pasir	12.5919	-1.7851	-0.8880
29	Binjai	Belawan PTLGU	12.4916	-3.0603	-0.2599
30	Paya Geli	Binjai	26.2532	-5.4598	-0.3704
31	Paya Geli	Selayang	38.6450	1.7923	-0.1626
32	KIM II	Pancing	4.9912	0.1084	-0.2502
33	Paya Geli	Helvetie	12.6517	0.9235	0.3640
34	Paya Geli	Glugur	19.8439	1.0479	0.3624
35	Glugur	Helvetie	9.4848	0.4474	0.2875
36	Binjai	Kuala	7.6676	0.3153	0.1377
37	Binjai	Tanjung Pura	9.3227	-1.2446	0.2129

Line	From Bus	To Bus	Kondisi tanpa UPFC		
			I Flow	P Flow	Q Flow
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
38	Binjai	P. Susu	6.0267	-1.4297	-0.2152
39	P. Susu	P. Brandan	33.3473	3.8429	0.6217
40	Binjai	P. Brandan	7.2184	-1.4701	-0.4127
41	Tanjung Pura	P. Brandan	11.0619	-1.7785	-0.0374
42	Sumut	Belawan PLTU	60.8487	4.9986	0.6129
43	Pancing	Percut	18.6856	-2.1251	-0.4093
45	Galang	Negeri Dolok	4.0455	-0.2061	-0.2286
46	Paya Geli	Namurambe	1.6422	0.0893	-0.0126
47	Paya Geli	Titi Kuning	4.7355	0.3044	-0.2657
48	Namurambe	Galang	6.2461	-0.5938	-0.7557
50	Brastagi	Kuta Cane (NAD)	0.9581	-0.0417	-0.0468
51	Brastagi	Renun 1,2	1.4436	-0.2067	-0.0154
52	Brastagi	Wampu	4.2648	-0.2755	-0.3425
53	Brastagi	Dairi	0.7754	-0.0811	-0.0356
54	KIM	KIM II	10.2886	0.9321	0.2291
55	Mabar	GIS Listrik	27.4175	2.4224	1.1171
56	Gis Listrik	Batu Gingging	20.3979	0.7919	0.8805
57	Selayang	Namurambe	27.9745	0.5142	-0.7905
58	Brastagi	Titi Kuning	5.9306	1.0891	0.2082
59	Namurambe	Titi Kuning	8.8580	0.3599	-0.4516
60	Teladan	Sei Kera	16.9233	0.2301	-0.9899
61	KIM	Percut	53.6254	-2.9416	-1.8937
62	Sei Rotan	Percut	44.3393	-1.1906	-2.0743
63	Sei Rotan	KIM II	2.2773	0.2329	0.0316
64	Denai	Pancing	6.2056	-0.2111	-0.5174
66	GIS Listrik	Titi Kuning	10.0821	0.2988	-0.3713
67	Teladan	Titi Kuning	27.0552	-2.1658	0.0368
68	Denai	Sei Rotan	5.3949	-0.6547	-0.0027
69	T. Morawa	Sei Rotan	5.5769	-0.4617	-0.1106

Line	From Bus	To Bus	Kondisi tanpa UPFC		
			I Flow	P Flow	Q Flow
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
75	Sei Rotan	Titi Kuning	12.7628	1.2375	1.1020
76	KIM	Sei Rotan	0.8462	-0.0388	-0.0036
77	Sumbagut 1,3,4	Percut	79.0900	6.2779	4.3008
80	P. Siantar	G Para	6.5760	0.6140	-0.1277
81	P. Siantar	Tanah Jawa	2.0970	0.0604	-0.3761
82	Perbaungan	T. Tinggi	1.4385	0.1440	-0.0994
83	Porsea	Tarutung	3.8755	-0.2139	0.0437
84	P. Siantar	Porsea	7.0714	-1.6275	0.0347
85	Tarutung	Tele	0.6243	0.0472	-0.0409
86	Tarutung	Sidikalang	5.9664	0.6108	-0.1604
87	Sei Rotan	Belawan PTLGU	9.4630	-2.9756	0.2758
88	Sigundong	Tarutung	3.2125	0.2800	0.0865
89	Sibolga	Martabe	0.8430	0.0453	-0.0074
90	Sibolga	Labuhan Angin	4.8506	-1.2485	-0.0526
91	Tarutung	Sibolga	3.3650	-1.0276	0.1112
92	Sipan 1	Sibolga	2.9793	0.1304	0.0409
93	Sipan 2	Sipan 1	3.7935	-0.0016	-0.0238
94	Sipan 2	Sibolga	2.9776	0.1302	0.0410
95	Sibolga	P. Sidempuan	1.1593	0.0262	-0.0512
96	P. Sidempuan	Martabe	0.4770	0.0194	0.0012
97	Tele	Pangururan	2.6413	0.0844	0.0358
98	Labuhan	Belawan PLTU	2.2542	-0.2113	-0.1755
99	Tele	Sidikalang	0.7552	0.0371	-0.0259
100	Sidikalang	Brastagi	8.7173	0.9529	-0.0635
101	Dolok Sanggul	Pakat	0.8478	-0.0199	-0.0419
102	Sidikalang	Renun 1,3	1.8990	-0.1737	-0.0444
103	Tarutung	Dolok Sanggul	0.9298	-0.0292	-0.0429
104	Parlilitan	Dolok Sanggul	2.0771	0.2012	0.0104
105	Tele	Dolok Sanggul	1.0462	-0.0847	-0.0053

Line	From Bus	To Bus	Kondisi tanpa UPFC		
			I Flow	P Flow	Q Flow
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
109	Lamhotma	Belawan PLTU	9.3561	-0.9548	-0.3953
110	PLTA Asahan 3	Simangkok	2.0451	1.2393	0.1880
112	T. Tinggi	Sei Rotan	1.9090	-0.3330	-0.1257
113	T. Tinggi	G Para	5.4817	-0.4273	0.0858
114	K. Tanjung	Perdagangan	1.9569	0.3172	0.0108
115	K. Tanjung	T. Tinggi	3.0260	-0.1115	0.2961
116	AE Kanopan	Hasang 1	18.2276	-0.3271	-0.3118
117	K. Tanjung	Kisaran	1.6773	-0.0834	0.0500
118	Perdagangan	Kisaran	2.0511	-0.3483	0.0171
119	AE Kanopan	Kisaran	36.0586	1.7674	-0.0630

C. Tabel aliran arus pada setiap saluran setelah pemasangan UPFC

Line	From Bus	To Bus	Kondisi tanpa UPFC		
			I Flow	P Flow	Q Flow
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
1	Sei Kera	Denai	3.3060	-0.3083	-0.0359
2	Rantau Prapat	AE Kanopan	35.2592	1.6558	-0.3428
3	Sei Kera	Pancing	10.5013	-0.5529	-1.5005
4	Labuhan	Lamhotma	7.0264	-0.3529	-0.1010
5	Kisaran	Tanjung Balai	7.2882	0.8007	-0.1073
6	Rantau Prapat	Kota Pinang	3.6369	-0.4200	-0.2032
7	Rantau Prapat	Kisaran	0.6617	0.0340	-0.0487
8	P. Sidempuan	G. Tua	3.0031	0.8459	-0.1899
9	G. Tua	Rantau Prapat	1.8632	0.4980	-0.2073
11	Sibuhuan	G. Tua	1.9189	-0.1947	-0.0951
12	Labuhan Bilik	Rantau Prapat	2.2808	-0.1989	-0.0971
14	Paya Pasir	Sei Rotan	3.5576	0.1273	-0.4722
15	N. P. Sidempuan	P. Sidempuan	26.2505	0.8003	0.2497

Line	From Bus	To Bus	Kondisi tanpa UPFC		
			I Flow	P Flow	Q Flow
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
16	Rantau Prapat	P. Sidempuan	2.4205	-0.9456	0.2382
18	Natal	Panyabungan	1.5664	0.2255	-0.0174
19	PLTP S Merapi	Natal	3.0884	0.2906	0.0119
20	PLTP S Merapi	Panyabungan	9.3385	1.6087	0.0080
21	P. Sidempuan	Panyabungan	4.6315	-1.6750	0.2932
24	Paya Pasir	Belawan PLTU	31.3272	-5.5197	-1.3566
25	Mabar	Paya Pasir	22.9986	-3.0379	-0.7402
26	Mabar	KIM	7.0797	-0.0476	-0.7014
27	Paya Geli	Batu Gingging	13.5620	1.0488	0.0243
28	Paya Geli	Paya Pasir	12.6861	-1.8338	-0.8559
29	Binjai	Belawan PTLGU	11.3483	-2.5090	-0.3610
30	Paya Geli	Binjai	25.2923	-5.0590	-0.4516
31	Paya Geli	Selayang	36.6880	1.6162	-0.1374
32	KIM II	Pancing	4.9414	0.1008	-0.2475
33	Paya Geli	Helvetie	12.6515	0.9235	0.3640
34	Paya Geli	Glugur	19.8436	1.0479	0.3623
35	Glugur	Helvetie	9.4848	0.4474	0.2875
36	Binjai	Kuala	7.6675	0.3153	0.1377
37	Binjai	Tanjung Pura	9.3947	-1.2601	0.2373
38	Binjai	P. Susu	6.0570	-1.4473	-0.1958
39	P. Susu	P. Brandan	33.4816	3.8809	0.5820
40	Binjai	P. Brandan	7.2561	-1.4917	-0.3939
41	Tanjung Pura	P. Brandan	11.1096	-1.7942	-0.0136
42	Sumut	Belawan PLTU	60.8029	4.9986	0.5472
43	Pancing	Percut	18.6096	-2.1051	-0.4202
45	Galang	Negeri Dolok	4.0456	-0.2061	-0.2286
46	Paya Geli	Namurambe	1.5261	0.0766	-0.0142
47	Paya Geli	Titi Kuning	4.3775	0.2347	-0.2533
48	Namurambe	Galang	6.4033	-0.6698	-0.7560

Line	From Bus	To Bus	Kondisi tanpa UPFC		
			I Flow	P Flow	Q Flow
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
50	Brastagi	Kuta Cane (NAD)	0.9516	-0.0417	-0.0456
51	Brastagi	Renun 1,2	1.5209	-0.2300	-0.0024
52	Brastagi	Wampu	4.2147	-0.2755	-0.3292
53	Brastagi	Dairi	0.7714	-0.0811	-0.0333
54	KIM	KIM II	10.2555	0.9256	0.2297
55	Mabar	GIS Listrik	27.3789	2.4161	1.1128
56	Gis Listrik	Batu Gingging	20.8614	0.8852	0.8663
57	Selayang	Namurambe	26.3389	0.3383	-0.7644
58	Brastagi	Titi Kuning	6.6516	1.3904	0.1105
59	Namurambe	Titi Kuning	8.1847	0.2473	-0.4265
60	Teladan	Sei Kera	17.0723	0.2250	-1.0095
61	KIM	Percut	53.8330	-2.9562	-1.9210
62	Sei Rotan	Percut	44.0761	-1.2027	-2.0345
63	Sei Rotan	KIM II	2.2733	0.2318	0.0335
64	Denai	Pancing	6.1655	-0.1899	-0.5179
66	GIS Listrik	Titi Kuning	9.3785	0.1992	-0.3611
67	Teladan	Titi Kuning	27.0258	-2.1607	0.0565
68	Denai	Sei Rotan	5.3189	-0.6363	-0.0108
69	T. Morawa	Sei Rotan	5.0188	-0.3605	-0.1337
70	T. Morawa	Denai	4.3062	0.4035	-0.0496
71	T. Morawa	Galang	18.5258	-2.0206	-0.6654
72	Kualanamu	T. Morawa	11.7064	-1.0480	-0.4785
73	Perbaungan	Kualanamu	5.0983	-0.1594	-0.0620
74	Perbaungan	Sei Rotan	1.5124	-0.1845	-0.0580
75	Sei Rotan	Titi Kuning	12.8421	1.2194	1.1523
76	KIM	Sei Rotan	0.8498	-0.0389	-0.0051
77	Sumbagut 1,3,4	Percut	79.1105	6.2845	4.2982
80	P. Siantar	G Para	9.0934	1.1986	0.0358
81	P. Siantar	Tanah Jawa	1.3655	-0.0602	-0.1499

Line	From Bus	To Bus	Kondisi tanpa UPFC		
			I Flow	P Flow	Q Flow
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
82	Perbaungan	T. Tinggi	1.3466	-0.1128	-0.1039
83	Porsea	Tarutung	3.3060	0.0665	0.1443
84	P. Siantar	Porsea	6.1624	-1.2120	0.2437
85	Tarutung	Tele	0.6793	0.0628	-0.0389
86	Tarutung	Sidikalang	7.0514	0.8687	-0.1534
87	Sei Rotan	Belawan PTLGU	8.7056	-2.5217	0.1935
88	Sigundong	Tarutung	3.1410	0.2800	0.0096
89	Sibolga	Martabe	0.7847	0.0392	-0.0063
90	Sibolga	Labuhan Angin	4.8505	-1.2485	-0.0510
91	Tarutung	Sibolga	3.4115	-1.0533	0.1383
92	Sipan 1	Sibolga	2.9610	0.1304	0.0349
93	Sipan 2	Sipan 1	3.7935	-0.0016	-0.0238
94	Sipan 2	Sibolga	2.9593	0.1302	0.0350
95	Sibolga	P. Sidempuan	1.0172	0.0060	-0.0438
96	P. Sidempuan	Martabe	0.5457	0.0254	0.0001
97	Tele	Pangururan	2.6412	0.0844	0.0358
98	Labuhan	Belawan PLTU	2.2542	-0.2113	-0.1755
99	Tele	Sidikalang	0.9524	0.0627	-0.0354
100	Sidikalang	Brastagi	9.9326	1.2337	-0.1242
101	Dolok Sanggul	Pakat	0.8027	-0.0199	-0.0365
102	Sidikalang	Renun 1,3	1.7620	-0.1502	-0.0358
103	Tarutung	Dolok Sanggul	0.9507	0.0037	-0.0542
104	Parlilitan	Dolok Sanggul	2.0758	0.2012	0.0028
105	Tele	Dolok Sanggul	1.1062	-0.0947	0.0062
106	Sidikalang	Dolok Sanggul	0.9030	-0.0995	0.0173
107	Sidikalang	Salak	2.8092	-0.2326	-0.0620
108	Sarulla	Simangkok	3.6103	0.6886	-0.0364
109	Lamhotma	Belawan PLTU	9.3561	-0.9548	-0.3953
110	PLTA Asahan 3	Simangkok	2.0451	1.2393	0.1880

Line	From Bus	To Bus	Kondisi tanpa UPFC		
			I Flow	P Flow	Q Flow
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
112	T. Tinggi	Sei Rotan	1.0922	-0.0668	-0.0955
113	T. Tinggi	G Para	8.3268	-1.0039	-0.0563
114	K. Tanjung	Perdagangan	2.0015	0.3299	0.0374
115	K. Tanjung	T. Tinggi	2.6766	-0.1660	0.1836
116	AE Kanopan	Hasang 1	18.2280	-0.3271	-0.3118
117	K. Tanjung	Kisaran	2.0281	-0.0416	0.1359
118	Perdagangan	Kisaran	2.0366	-0.3428	0.0262
119	AE Kanopan	Kisaran	35.6488	1.7210	-0.1612

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Khalid Oki Wibowo, dilahirkan di kota Jakarta, 16 Maret 1992. Pada tahun 1997 – 1998, penulis memulai pendidikannya di TK Al Amin. Kemudian pada tahun 1998 – 2004 melanjutkan ke SDN Sepanjang Jaya VI. Setelah itu pada tahun 2004 – 2007, ia melanjutkan pendidikannya ke SMP Negeri 16 Bekasi, setelah lulus ia melanjutkan ke SMA Negeri 13 Bekasi pada tahun 2007 -

2010. Kemudian penulis bekerja di PT. Astra Honda Motor selama 2 tahun. Pada tahun 2012, ia melanjutkan ke Jurusan D3 Teknik Elektro Industri ITS – DISNAKER hingga lulus tahun 2015. Penulis kemudian melanjutkan studi Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya jurusan Teknik Elektro dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.

email : khalidokiwbowo@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan